

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



CENTRO TÉCNICO CIENTÍFICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Douglas de Mesquita Pires de Sousa
Luiz Felipe de Abreu e Lima Pamplona

**MECANISMOS DE CONFINAMENTO DE PILARES DE CONCRETO
ENCAMISADOS COM POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS DE
CARBONO SUBMETIDOS À COMPRESSÃO CENTRADA**

Rio de Janeiro
2018



Douglas de Mesquita Pires de Sousa
Luiz Felipe de Abreu e Lima Pamplona

**MECANISMOS DE CONFINAMENTO DE PILARES DE CONCRETO
ENCAMISADOS COM POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS DE
CARBONO SUBMETIDOS À COMPRESSÃO CENTRADA**

Projeto Final, apresentado ao Curso de Graduação
do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio
como requisito parcial para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Emil de Souza Sánchez Filho

Rio de Janeiro
(2018.2)



AGRADECIMENTO

Aos meus pais, Antonio e Damiana, que sempre me deram total apoio e incentivo em todas as minhas escolhas e nunca mediram esforços para investir na minha educação pessoal e profissional.

Ao professor Emil Sánchez, orientador desse trabalho, pelo apoio, colaboração e rigor científico exigido para orientar esse trabalho, bem como pela amizade iniciada nesse período de estudo.

Aos meus professores do ensino fundamental Jonas Beserra, Esdras Martins, Sandra, Katia Amaral. Eles formaram a base de todo o meu conhecimento e são responsáveis pelo meu caminho acadêmico.

A todos os professores do departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, que compartilharam seus conhecimentos durante e depois de suas inesquecíveis aulas.

A todo meu ciclo de amigos, que sempre me ouviram, apoiaram e incentivaram nos momentos mais desanimadores da minha graduação, em especial ao meu grande amigo Luiz Felipe Pamplona, coautor desse estudo.

Douglas Pires



AGRADECIMENTO

A minha amada família, Luciana, Fernando e João Pedro, que sempre me apoiou e incentivou a continuar mesmo diante das dificuldades encontradas no caminho. Se cheguei a algum lugar, foi graças a vocês. Seus exemplos diários de caráter, esforço, dedicação e amor sem dúvida me nortearão para o resto de minha vida.

A minha namorada, Nicolle, que esteve ao meu lado em todos os momentos frustrantes para me amparar e em todos os felizes para celebrar comigo. Sempre me motivando a dar o melhor de mim tanto na vida pessoal quanto na acadêmica e profissional.

Ao professor Emil Sánchez, por todas as lições passadas e questionamentos deixados nas descontraídas aulas, sobretudo com o objetivo de incentivar a busca incessante por conhecimento. Por tentar sempre transmitir suas experiências para a sala de aula e nossas mentes se tornarem um pouco menos limitadas.

Aos meus queridos amigos de faculdade que tornaram essa jornada mais prazerosa e transformaram a universidade em uma experiência incrível. Que nós façamos esforço para manter a alcateia unida por quanto tempo pudermos.

Ao meu tão estimado amigo e coautor deste trabalho Douglas Pires, que sempre contagia a todos com sua alegria, foco, determinação e extrema competência. Desejo que possas ir tão longe quanto poderes sonhar.

Luiz Felipe Pamplona



RESUMO

Esse trabalho aborda uma revisão bibliográfica e uma análise teórica dos modelos de confinamento de pilares de concreto armado reforçado com compósitos de fibras de carbono. A revisão bibliográfica aborda assuntos referentes a fatores que influenciam o confinamento do pilar de concreto armado como o confinamento parcial e completo, os modelos para calcular a interferência da geométrica da seção transversal do pilar quando não circulares e os modelos para cálculo da tensão e deformação de confinamento do concreto confinado com compósito de fibras de carbono. Efetuou-se um ábaco tensão no concreto versus taxa de aço na seção para alguns números de camada. Foi utilizando os modelos teóricos para a construção o ábaco que auxilia o dimensionamento do número de camadas necessária para reforçar um pilar circular de concreto armado sabendo seu raio, sua taxa de armadura e a tensão no concreto. Efetuou-se ainda uma análise de comparação dos modelos teóricos de tensão de confinamento e de índice de esbeltes que influenciam o encamisamento de pilares de concreto armado não circulares.

Palavras-chave: concreto, pilares, materiais compósitos, polímero reforçado com compósito fibras de carbono, confinamento, encamisamento, reforço.



ABSTRACT

This work presents a bibliographic review and theoretical analysis of confinement models for reinforced concrete columns strengthened with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites. The bibliographic review covers factors influencing the confinement of reinforced concrete columns, including partial and full confinement, models for accounting for the geometric effects of non-circular cross-sections, and models for calculating the confinement stress and strain of concrete confined with CFRP composites. A concrete stress versus steel reinforcement ratio chart was developed for varying numbers of CFRP layers, using theoretical models to construct a design chart that assists in determining the number of layers required to strengthen a circular reinforced concrete column based on its radius, reinforcement ratio and concrete stress. A comparative analysis was also conducted of theoretical models for confinement stress and slenderness index, both of which influence the jacketing of non-circular reinforced concrete columns.

Keywords: concrete, columns, composite materials, carbon fiber reinforced polymer (CFRP), confinement, jacketing, strengthening.



SUMÁRIO

1.	Introdução	17
1.1.	Reforços estruturais	17
2.	Compósitos de fibras de carbono	18
2.1.	História	18
2.2.	Composição	19
2.2.1.	Compósitos	19
2.4.	Casos de aplicações de reforço de CFC na Engenharia Civil	23
3.	Reforço de pilares de concreto armado	27
3.1.	Confinamento	27
3.2.	Equações básicas de relação tensão deformação para confinamento de colunas	29
3.3.	Geometria de pilares	31
3.3.1.	Modelo de Mander <i>et al.</i> (1988) para calcular o coeficiente de esbeltez K_s	33
3.3.2.	Modelo de Karam e Tabbara (2005) para o cálculo do coeficiente de esbeltez K_s	34
3.3.3.	Modelo de Lam e Teng (2003b) para o cálculo do coeficiente de esbeltez k_s	35
3.4.	Tipos de reforços	38
3.4.1.	Adição de armadura metálica externamente	38
3.4.2.	Encamisamento metálico	38
3.4.3.	Encamisamento com CFC	39
3.5.	Execução do reforço em CFC	40
4.	Modelos teóricos para o reforço com CFC	45
4.1.	Modelos de resistência do concreto armado confinado	45
4.1.1.	Mirmiran e Shahawy	45
4.1.2.	Mander <i>et al.</i>	46
4.2.	Deformação específica do concreto armado confinado	46



4.3.	Deformações últimas de concreto armado confinado	47
4.3.1.	Seible <i>et al.</i>	47
4.3.2.	Lam e Teng (2003a)	47
4.4.	Modelos orientados a projeto	48
4.5.	Modelos orientados a análise	49
5.	Análise dos resultados obtidos com os modelos	52
5.1.	Materiais analisados	52
5.2.	Geometrias e condições de análise escolhidas	52
5.3.	Dimensionamento de reforços em CFC	54
5.3.1.	Construção dos ábacos para dimensionamento de pilares circulares	54
5.3.2.	Exemplos de aplicação dos ábacos	55
5.3.2.1.	Resultado de dimensionamento do reforço para o pilar P01	56
5.3.2.2.	Resultado de dimensionamento do reforço para o pilar P02	57
5.3.2.3.	Resultado de dimensionamento do reforço para o pilar P03	59
5.3.3.	Análise da significância de modelos propostos para o cálculo de k_s de pilares retangulares	63
5.3.3.1.	Resultado da análise do pilar P04	63
5.3.3.2.	Resultado da análise do pilar P05	64
6.	Considerações finais	67
6.1.	Sugestão para trabalhos futuros	67
7.	Referências	68



Lista de figuras

- Figura 2.1 - Reforço com compósito de fibras de carbono no Viaduto Santa Tereza, Belo Horizonte. Fonte: Techne. Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/125/imagens/125construir1.jpg>> Consulta em 01/10/2018.19
- Figura 2.2– Compósito de fibra de carbono (CURTY, 2009).20
- Figura 2.3 - Diagramas tensão vs. deformação específica Fonte: Techne. Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/125/artigo285695-2.aspx>> Consulta em 01/10/2018.21
- Figura 2.4 – Reforço de pilares de concreto armado no estádio Maracanã. Fonte: Techne. Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/194/imagens/i381178.jpg>> Acessado em 18/10/2018.24
- Figura 2.5 – Reforço da torre de transmissões da Rede Globo de Televisões (CURTY, 2009).25
- Figura 2.6 – Deslocamento do edifício da secretaria de estado da fazenda de Minas Gerais. Fonte: Apresentação de Ari de Paula Machado na ABECE. Disponível em: <<http://www.abece.com.br/e-artigosabece007.pdf>> Consulta em 18/10/2018.26
- Figura 2.7 – Aplicação do reforço com CFC no edifício da secretaria de estado da fazenda de Minas Gerais. Fonte: Apresentação de Ari de Paula Machado na ABECE. Disponível em: <<http://www.abece.com.br/e-artigosabece007.pdf>> Consulta em 18/10/2018.26
- Figura 3.1 — Deformações longitudinais e transversais resultantes da aplicação da força axial F (PINHEIRO *et al.*, 2004).27



Figura 3.2 – Diagrama tensão vs. deformação específica de pilares sem reforço, com reforço em confinamento em aço e em polímeros reforçados com fibras. (WU e WEI, 2015).	28
Figura 3.3 – Comportamentos mecânicos de FRP (CFRP e GFRP) em comparação com aço leve traduzido em um mesmo diagrama tensão vs. deformação específica (BENZAID <i>et al.</i> , 2013).	28
Figura 3.4 – Tensão lateral de confinamento gerada pelo carregamento interno uniforme resultante do efeito Poisson.	29
Figura 3.5 – Tensão vs. deformação específica para concreto não-confinado e para diferentes taxas de confinamento com CFC (MOTAVALLI, 2014).	31
Figura 3.6 – Efeito de arqueamento da tensão em seções diferentes (adaptado de AL-SALLOUM <i>apud</i> HENRIQUES, 2015).	32
Figura 3.7- Seção retangular confinada com CFC (adaptado de FIB BULLETIN, 2011).	34
Figura 3.8 – Diagrama de corpo livre do quadrante superior direito (KARAM, G. e TABBARA <i>apud</i> LANG e HERWING, 2013). (a) Forças que atuam no concreto. (b) Forças que atuam no confinamento	35
Figura 3.9 – Área da seção de concreto efetivamente confinada (HOLLAWAY, L.C e TENG J.G <i>apud</i> LANG e HERWING, 2013).	36
Figura 3.10 – Seção transversal elíptica equivalente (adaptado de LANG e HERWING 2013).	37
Figura 3.11 – Tipos de encamisamento com CFC (WU, 2006 <i>apud</i> HENRIQUES, 2015): a) encamisamento contínuo; b) encamisamento parcial.	39



Figura 3.12 – Zonas não confinadas do encamisamento parcial de um pilar (adaptado do FIB Bulletin 14, 2001).....	40
Figura 3.13 — Sequência de execução do sistema CFC. (HENRIQUE 2015): a) preparação da superfície; b) aplicação do primário; c) reparação da superfície; d) aplicação da primeira camada de resina; e) aplicação dos tecidos; f) aplicação da segunda camada de resina; g) revestimento de proteção.....	43
Figura 3.14 – Saturação via úmida do tecido de CFC (MACHADO, 2010).....	43
Figura 3.15 – Sequência de aplicação do sistema CFRP. (Adaptado de SILVA, 2013).....	44
Figura 4.1 – Modelo orientado a projeto (LAM e TENG, 2003).	48
Figura 4.2 - Procedimento iterativo (Adaptado de Spoelstra e Monti, 1999).	51
Figura 5.1 - Ábaco de dimensionamento de número de CFC para pilares de diâmetro de 60 cm pelo modelo de confinamento de Lam e Teng (2002).	56
Figura 5.2 - Ábaco de dimensionamento de número de CFC para pilares de diâmetro de 60 cm pelo modelo de confinamento Mander <i>et al.</i> (1988).....	57
Figura 5.3 - Ábaco de dimensionamento de número de CFC para pilares de diâmetro de 80 cm pelo modelo de confinamento de Lam e Teng(2002).	58
Figura 5.4 - Ábaco de dimensionamento de número de CFC para pilares de diâmetro de 80 cm pelo modelo de confinamento Mander <i>et al.</i> (1988).....	59
Figura 5.5 - Ábaco de dimensionamento de número de CFC para pilares de diâmetro de 100 cm pelo modelo de confinamento de Lam e Teng(2002).	60
Figura 5.6 - Ábaco de dimensionamento de número de CFC para pilares de diâmetro de 100 cm pelo modelo de confinamento de Mander <i>et al.</i> (1988).....	61



Figura 5.7 – Diagrama de barras com os desvios padrões dos modelos	62
Figura 5.8 – Diagrama de colunas para análise gráfica dos resultados de $f_{l,a}$ propostos pelos diversos modelos de cálculo de k_s	63
Figura 5.9 – Diagrama de caixas dos resultados para o pilar P04.....	64
Figura 5.10 – Diagrama de colunas para análise gráfica dos resultados de $f_{l,a}$ propostos pelos diversos modelos de cálculo de k_s	65
Figura 5.11 – Diagrama de caixas dos resultados para o pilar P05.....	65
Figura 5.12 – Envoltórias de tensões laterais de confinamento, considerando resultados apresentados anteriormente para os pilares P04 e P05, combinados.....	66



Lista de Tabelas

Tabela 2.1– Propriedades mecânicas típicas de mantas de fibras de carbono e fibras de carbono de elevado módulo. (CORREIA, 2012 <i>apud</i> FIGUEIRA, 2016).	22
Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas de matrizes do tipo termofixas. (Adaptado de BARROS, 2007 <i>apud</i> FIGUEIRA, 2016).	23
Tabela 5.1 – Materiais e propriedades.	52
Tabela 5.2 – Geometrias dos pilares-exemplo.	53
Tabela 5.3 – Características geométricas, resistências dos pilares sem reforço e novas cargas solicitantes (N_d).	53
Tabela 5.4 – Resistências de projeto da seção confinada em função do modelo de cálculo e número de camadas de CFC para o pilar 01	54
Tabela 5.5 - Resistências de projeto da seção confinada em função do modelo de cálculo e número de camadas de CFC para o pilar 02.	54
Tabela 5.6 - Resistências de projeto da seção confinada em função do modelo de cálculo e número de camadas de CFC para o pilar 03.	55
Tabela 5.7 – Resumo do número de camadas de CFC necessárias conforme o pilar e o método.	61
Tabela 5.8 – Desvio padrão dos resultados obtidos.	62
Tabela 5.9 – Tensões laterais de confinamento ($f_{l,a}$) calculadas com diferentes modelos de cálculo das taxas de eficiência geométricas para o pilar P04.	63
Tabela 5.10 – Tensões laterais de confinamento ($f_{l,a}$) calculadas com diferentes modelos de cálculo das taxas de eficiência geométricas para o pilar P05.	64



Lista de Símbolos

Romanos

A_c	Área de concreto da seção transversal do pilar
A_e	Área de concreto efetivamente confinado
A_g	Área da seção transversal do pilar com cantos arredondados
A_{sl}	Área de armadura longitudinal
b	Menor dimensão da seção transversal do pilas, eixo maior da seção transversal elíptica
d	Diâmetro do pilar, diâmetro equivalente do pilar, proposto por Lam e Teng;
E_2	Inclinação do segundo trecho do gráfico tensão-deformação específica dada por Lam e Teng
E_c	Módulo de elasticidade do concreto
E_f	Módulo de elasticidade do confinamento com CFC
f_0	Tensão correspondente à interseção dos trechos parabólico e linear
f'_{c0}	Resistências à compressão do concreto não-confinado
f'_{cc}	Resistências à compressão do concreto confinado
$f_{l,a}$	Tensão de confinamento máxima
h	Maior dimensão da seção transversal do pilar, eixo menor da seção transversal elíptica
k_1	Coefficiente de efetividade
k_2	Coefficiente de aprimoramento de deformação específica proposto por Richart <i>et al.</i> (1929)
k_p	Coefficiente que leva em conta o efeito do envolvimento parcial
k_s	Coefficiente de esbeltez da seção transversal de pilares retangulares
n	Número de camadas de CFC
r_c	Raio de curvatura do canto da seção transversal do pilar



s' Distância entre duas faixas consecutivas de CFC

t_f Espessura do encamisamento com CFC

Gregas

β Constante dependendo da propriedade do concreto

ε_{c0} Deformação específica compressiva do concreto não confinado em sua resistência à compressão não confinada

$\varepsilon_{f,rupt}$ Deformação específica última de ruptura corrigida

ε_f Deformação específica circunferencial de ruptura do encamisamento com CFC

ε_t Deformação específica correspondente ao ponto de tensão f_0

ρ_{sc} Taxa geométrica das armaduras longitudinais em relação à área total da seção de concreto

ρ_f Taxa volumétrica do CFC de confinamento

σ_f Tensão lateral de confinamento última

σ_l Tensão lateral de confinamento

Lista de Abreviaturas

ACI American Concrete Institute

ASTM American Society for Testing and Materials

CFC Compósito de Fibra de Carbono

CFRP Carbon Fiber Reinforced Plastic

GFRP Glass Fiber Reinforced Plastic

GFRP Glass Fiber Reinforced Plastic



Objetivos

Este trabalho visa o aprofundamento dos conhecimentos existentes no domínio do reforço de pilares de concreto armado por meio de uma análise e comparação numéricas entre modelos encontrados na literatura a respeito do dimensionamento de reforço de CFC em pilares de concreto armado submetidos a efeitos de compressão centrada.

Os principais objetivos que orientam esse trabalho foram os seguintes:

- Construção de um ábaco para cada modelo teórico de confinamento para auxiliar o dimensionamento do número de camadas de CFC necessárias para realizar o reforço de pilares de concreto armado de seção circular com carga centrada;
- Avaliar a adequação dos modelos teóricos existentes na literatura na previsão do comportamento da tensão de confinamento do CFC sobre pilares de concreto armado;
- Avaliar a adequação dos modelos teóricos existentes na literatura quanto o cálculo da influência da geometria da seção transversal do pilar de concreto armado.



1. Introdução

1.1. Reforços estruturais

As patologias nas estruturas têm diversas causas, tais como: erros no projeto e/ou execução, degradação devido a interferências físico-químicas ao longo do tempo, sobrecarga na estrutura ou até mesmo ações excepcionais, como incêndios ou catástrofes naturais como furacões e terremotos. Tornando-se necessário a realização de reforço para reabilitar a estrutura.

Várias técnicas de reforço de pilares são encontradas na literatura, citando-se o reforço com perfis metálicos, o aumento da seção transversal da peça e o encamisamento com materiais compósitos. O encamisamento de pilares por meio de perfis metálicos ou compósitos (CFC, CFV, principalmente) gera o confinamento da seção com o intuito de adicionar pressão lateral ao pilar, dificultando o seu deslocamento radial e, assim, aumentando a capacidade resistente do concreto (CARRAZEDO, 2002).

Em geral os reforços de estruturas podem ser divididos em dois grupos: os passivos (mais comumente encontrados) e os ativos, nos quais é imposta determinada tração antes da aplicação no elemento estrutural. Este trabalho analisará o reforço passivo.

O estudo aqui descrito tem como objetivo o dimensionamento de um reparo com o encamisamento utilizando mantas de CFC. O dimensionamento baseou-se em calcular o incremento de resistência por confinamento por meio de diversos métodos experimentais presentes na literatura. Na parte final do estudo foi realizado uma comparação dos métodos utilizado.



2. Compósitos de fibras de carbono

2.1. História

A utilização dos compósitos de fibras de carbono teve início nos anos de 1960, com pesquisas desenvolvidas pelos Estados Unidos, Inglaterra e Japão. As primeiras utilizações foram no setor automobilístico, onde se passou a utilizar compósitos de carbono na fabricação de peças de carros para reduzir o peso e assim consumir menos combustível.

O Japão foi o país que mais contribuiu para o avanço das técnicas de utilização de CFC em reforços, devido à preocupação com os danos nas estruturas de concreto armado decorrentes aos abalos sísmicos. O país tinha a necessidade de realizar reforços cada vez mais rápidos para recuperar as estruturas danificadas.

No Brasil, a utilização da fibra de carbono é usada timidamente, sobretudo pela falta de uma norma técnica nacional. Quando utilizada as referências são as normas técnicas norte-americana (ACI 440 2R:02 2008) e o boletim 12 da FIB (Federação Internacional do Concreto). No ano de 2015 a ABECE (Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural) estimulou um comitê na ABNT a estudar a criação de uma norma brasileira sobre a aplicação de fibras de carbono em estruturas de concreto armado.

A primeira utilização do reforço com CFC no Brasil foi em 1990 com o reforço do viaduto Santa Tereza, em Belo Horizonte, Minas Gerais. A escolha do reforço em CFC foi devido às restrições estéticas. Não poderia ter aumento das secções e não poderia deixar concreto aparente, pois o viaduto é tombado pelo patrimônio histórico.



Figura 2.1 - Reforço com compósito de fibras de carbono no Viaduto Santa Tereza, Belo Horizonte. Fonte: Techne. Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/125/imagens/125construir1.jpg>> Consulta em 01/10/2018.

2.2. Composição

2.2.1. Compósitos

Os materiais compósitos reforçados com fibras são constituídos por dois tipos de matérias. O primeiro é a matriz, responsável por transferir e distribuir as tensões entre as fibras, manter as fibras na posição pretendida e protege-las de agressões ambientais. A segunda são as fibras, responsáveis pela resistência. As fibras são anisotrópicas com comportamento elástico até a ruptura.

A principal finalidade da produção de compósitos é o de combinar diversos materiais num único com propriedades superiores às dos componentes isolados. Dessa forma a sua combinação é decidida em função da aplicação específica do material compósito (LUCA, 2006).

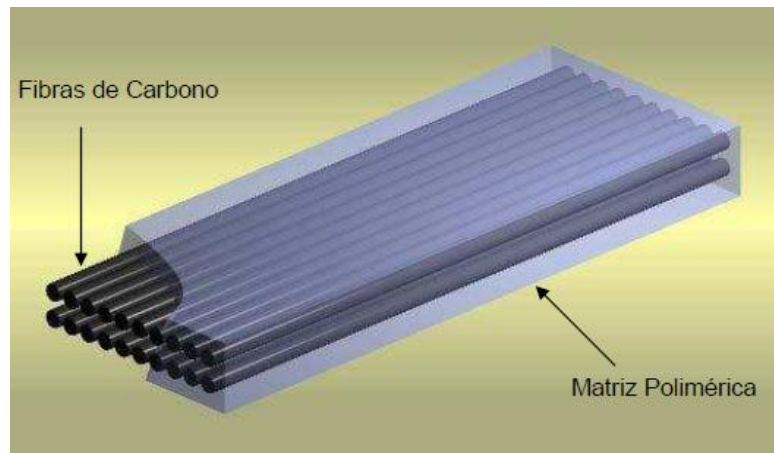


Figura 2.2– Compósito de fibra de carbono (CURTY, 2009).

2.2.2. Fibras

As principais fibras usadas comercialmente para reforço e/ou recuperação estrutural são as de carbono, vidro e aramida. Essas fibras constituem, respectivamente, os compósitos PRFC (Polímero Reforçado com Fibras de Carbono), PRFV (Polímero Reforçado com Fibra de Vidro), PRFA (Polímero Reforçado com Fibras de Aramida). O tema desenvolvido neste trabalho é sobre o reforço com fibras de carbono, que serão apresentadas.

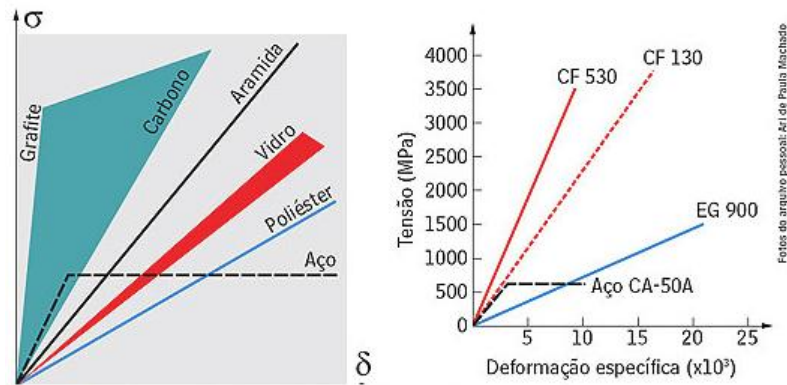


Figura 2.3 - Diagramas tensão vs. deformação específica Fonte: Techne. Disponível em: <http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/125/artigo285695-2.aspx> Consulta em 01/10/2018.

As fibras de carbono resultam do tratamento térmico de basicamente três tipos de matérias compostas de carbono: o rayon, a poliacrilonitrila (Pan) e piche de petróleo, sendo o mais utilizado a poliacrilonitrila. Após o tratamento térmico os átomos se alinham ao longo das fibras, conferindo uma maior resistência mecânica nessa direção.

As principais propriedades de tais fibras são: alta rigidez, baixo peso específico, baixa deformação e elevada resistência a ataques químicos diversos, não sendo afetada pela corrosão.



Tabela 2.1– Propriedades mecânicas típicas de mantas de fibras de carbono e fibras de carbono de elevado módulo. (CORREIA, 2012 *apud* FIGUEIRA, 2016).

Propriedade	CFRP	CFRP ¹
Espessura nominal [mm]	0.165-0.330	0.165
Largura [mm]	600	600
Arquitetura das fibras	Unidirecional	Unidirecional
Resistência à tração axial das fibras [MPa]	3790	3520
Módulo de elasticidade axial em tração das fibras [GPa]	230-300	370-640
Extensão axial na rotura [%]	1.67-1.70	0.94

As propriedades e comportamento mecânico do material compósito são principalmente afetados pelo tipo de fibra e pela orientação de seu arranjo. As mais utilizadas em reforços estruturais são as unidirecionais e bidirecionais (malhas).

2.2.3. Matrizes

A principal função da matriz no material compósito é manter o arranjo das fibras, atuando como o meio através do qual as solicitações externas são transmitidas e distribuídas para as fibras. A função secundária da matriz é atuar como elemento de proteção mecânica e ambiental, além de promover resistência lateral contra espalhamento da fibra submetida a carregamento de compressão. As matrizes podem ser poliméricas, metálicas ou cerâmicas. As matrizes poliméricas, também designadas de resinas, podem ser termofixas como epóxi, poliéster e fenol ou termoplásticas (SILVA FILHO, 2005). A principal diferença entre elas é que as estruturas moleculares das primeiras não se fundem quando submetidas a altas temperaturas, daí a origem de seus nomes.



Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas de matrizes do tipo termofixas. (Adaptado de BARROS, 2007 *apud* FIGUEIRA, 2016).

Resina	Módulo de elasticidade à tração [GPa]	Resistência à tração [MPa]	Extensão específica na ruptura [%]	Massa Específica [Kg/m ³]
Poliéster	2,1 - 4,1	20 - 100	1,0 - 6,5	1000 - 1450
Epoxidica	2,5 - 4,1	55 - 130	1,5 - 9,0	1100 - 1300

A adição de materiais do tipo *filler* tem como objetivo o preenchimento da matriz, possibilitando a redução de peso ou custo do produto final.

Para que a aderência do sistema matriz - fibras com o elemento estrutural a ser reforçado seja garantida, são usados adesivos. Os principais tipos são as resinas epóxicas.

2.3. Vantagens e desvantagens do reforço CFC

As principais vantagens do CFC são: o módulo de elasticidade alto - cerca de cinco vezes o módulo de elasticidade do aço; baixo peso específico não conferindo à estrutura sobrecarga devida ao reforço significativa; fina espessura variando de 0,15 mm a 2,8 mm; rapidez de execução.

As desvantagens permeiam as limitações da aplicação do CFC, a resina epóxica não pode ser aplicada em elementos sujeitos a um grau de umidade maior do que 4%, excluindo-se a utilização da matriz de fibras de carbono com resina epóxica em estruturas enterradas (como fundações e túneis) e também em obras marítimas.

2.4. Casos de aplicações de reforço de CFC na Engenharia Civil

O objetivo da aplicação do CFC vem da necessidade de reforçar ou corrigir danos de patologias que afetaram a estrutura. As aplicações do compósito em restauração e reforço abrangem diversos tipos, sejam elas residenciais, industriais ou pontes.

2.4.1. Estádio do Maracanã – Rio de Janeiro – RJ

O estádio de futebol Maracanã, localizado no Rio de Janeiro – Brasil, teve 60 pilares retangulares reforçados durante as obras para a Copa das Confederações FIFA 2013 e Copa do Mundo FIFA 2014 (LEONI e SOUZA, 2013). A opção escolhida como reforço foi de mantas de CFC em duas camadas Figura 2.4, permitindo que os pilares sustentasse a nova cobertura do estádio sem a necessidade de aumentar a seção além de permitir que o serviço fosse realizado em aproximadamente trinta dias.



Figura 2.4 – Reforço de pilares de concreto armado no estádio Maracanã. Fonte: Techne. Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/194/imagens/i381178.jpg>> Acessado em 18/10/2018.

2.4.2. Torre de Transmissão da Rede Globo de Televisões

No ano de 2002 a Rede Globo de Televisões com a necessidade de colocar novos equipamentos de transmissão de sinais solicitou o reforço de sua torre de transmissão na cidade do Rio de Janeiro.



Figura 2.5 – Reforço da torre de transmissões da Rede Globo de Televisões (CURTY, 2009).

2.4.3. Anexo III da Secretaria de Estado da Fazenda de Minas Gerais – Belo Horizonte – MG

O edifício da secretaria de estado da fazenda de Minas Gerais teve treze dos pavimentos reforçados com a utilização do CFC para corrigir deficiência estrutural em relação a ação do vento. Segundo Machado (2002) o prédio sofria um deslocamento de aproximadamente vinte e um centímetros e para realizar a correção foi utilizada 776 m² de fibras. O projeto recebeu do “International Concrete Repair Institute – ICRI” o prêmio de “Excelência em Reforço” na Reunião de 2003 em Tampa – FA – (USA).

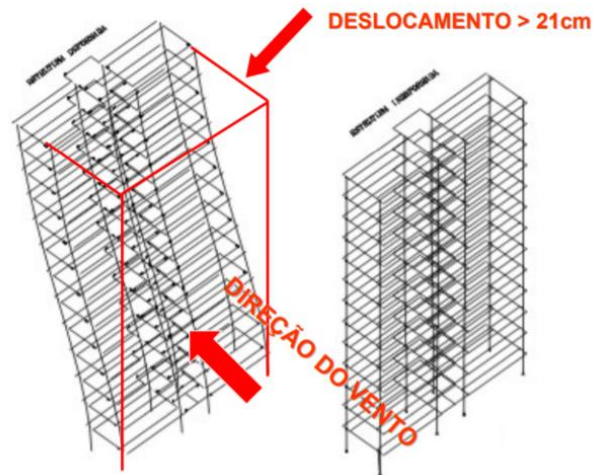


Figura 2.6 – Deslocamento do edifício da secretaria de estado da fazendo de Minas Gerais. Fonte: Apresentação de Ari de Paula Machado na ABECE. Disponível em: <<http://www.abece.com.br/e-artigosabece007.pdf>> Consulta em 18/10/2018.



Figura 2.7 – Aplicação do reforço com CFC no edifício da secretaria de estado da fazendo de Minas Gerais. Fonte: Apresentação de Ari de Paula Machado na ABECE. Disponível em: <<http://www.abece.com.br/e-artigosabece007.pdf>> Consulta em 18/10/2018.

3. Reforço de pilares de concreto armado

3.1. Confinamento

Os pilares de concreto armado submetidos à força axial de compressão se deformam longitudinalmente (encurtamento) e por efeito de Poisson, transversalmente.

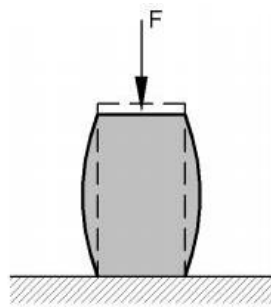


Figura 3.1 — Deformações longitudinais e transversais resultantes da aplicação da força axial F (PINHEIRO *et al.*, 2004).

Os confinamentos atuam aumentando a resistência à compressão e a deformação específicas última sob compressão criando um estado tri-axial de tensões no concreto. Tais incrementos se traduzem em um aumento de ductilidade do elemento confinado e resultam em um aumento da resistência da peça à flexão e da capacidade à rotação do elemento submetido à compressão, o que é importante para a sua aplicação em estruturas sujeitas a efeitos sísmicos.

As técnicas mais empregadas para confinamento externo são via encamisamento ou anéis metálicos. O comportamento mecânico do aço, contudo, é muito diferente do de CFC: o aço atinge uma deformação específica em regime de escoamento na ordem de 0,002 e exerce sua tensão confinante de modo praticamente constante. Os CFC se comportam em regime elástico até sua ruptura o que se dá com deformações específicas da ordem 0,01.

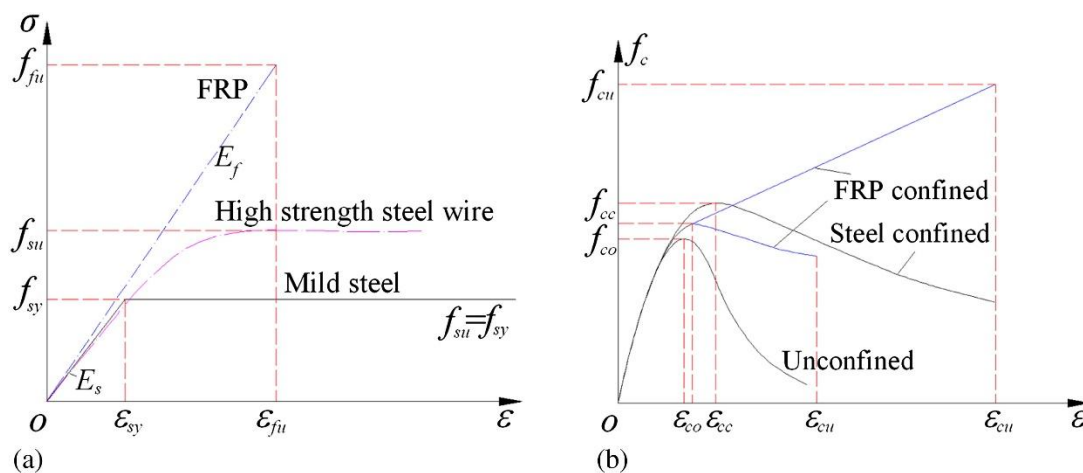


Figura 3.2 – Diagrama tensão vs. deformação específica de pilares sem reforço, com reforço em confinamento em aço e em polímeros reforçados com fibras. (WU e WEI, 2015).

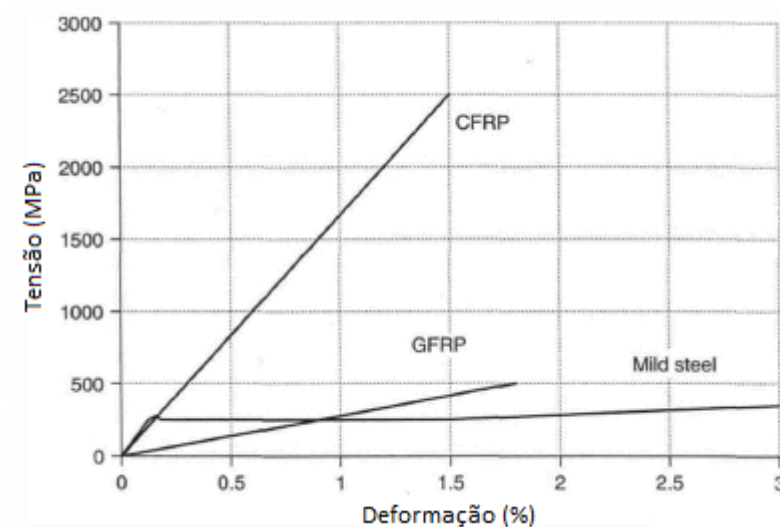


Figura 3.3 – Comportamentos mecânicos de FRP (CFRP e GFRP) em comparação com aço leve traduzido em um mesmo diagrama tensão vs. deformação específica (BENZAID *et al.*, 2013).

Além das evidentes vantagens em relação ao comportamento mecânico do aço, a execução de reforços em CFC é mais conveniente devido ao baixo peso específico do material e ao fato de o material não ser sujeito aos efeitos de corrosão.

3.2. Equações básicas de relação tensão deformação para confinamento de colunas

Quando uma coluna é submetida à compressão axial, a mesma tende a expandir lateralmente (Figura 3.4). Em situação de confinamento, no entanto, o mesmo se deforma de modo a se opor à expansão do elemento estrutural. No caso de tecidos de CFC, esses são tracionados.

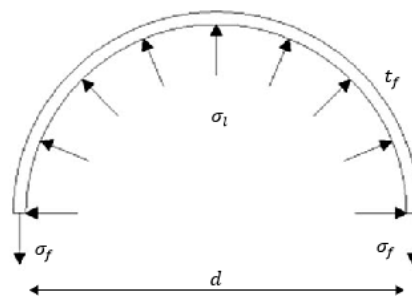


Figura 3.4 – Tensão lateral de confinamento gerada pelo carregamento interno uniforme resultante do efeito Poisson.

Considerando-se um pilar de seção circular, com confinamento contínuo admite-se que a tensão lateral de confinamento exercida sobre o concreto é uniforme ao longo do perímetro da seção. Por meio do equilíbrio de forças horizontais, têm-se as tensões horizontais:

$$\sigma_l = \frac{2t_f}{d} \sigma_f = \frac{2t_f}{d} E_f \varepsilon_f \rho_f, \text{ com } \rho_f = \frac{4t_f}{d} \quad (3.1)$$

onde

- σ_l – tensão lateral de confinamento;
- σ_f – tensão lateral de confinamento última;
- t_f – espessura do encamisamento;



- d – diâmetro do pilar;
- E_f – módulo de elasticidade do encamisamento ;
- ε_f – deformação específica circunferencial de ruptura do encamisamento com CFC;
- ρ_f – taxa volumétrica do CFC de confinamento.

Para o cálculo da tensão de confinamento máxima, Lam e Teng (2003a), Karam e Tabbara (2005) constataram que CFC apresentam ruptura ao atingirem 50 a 70% de sua deformação específica última, resultando em um fator de redução que varia entre 0,5 e 0,7, assim

$$f_{l,a} = \frac{2t_f}{d} E_f \varepsilon_{f,rupt} \approx \frac{2t_f}{d} E_f (0,5 \div 0,7 \varepsilon_{fu}) \quad (3.2)$$

onde

- $f_{l,a}$ – tensão de confinamento máxima;
- $\varepsilon_{f,rupt}$ – deformação específica última de ruptura corrigida.

A Figura 3.5 mostra que em pequenas deformações específicas, a curva tensão-deformação específica varia de acordo com a curva tensão-deformação específica do concreto não confinado. Somente em tensões elevadas, quando o concreto torna-se mais não linear, o efeito do confinamento é visível.

O efeito de confinamento origina um aumento da resistência à compressão do pilar. O comportamento mecânico de pilares confinados está intimamente relacionado

com a taxa de confinamento: quanto maior tal taxa, maiores são a resistência f'_{cc} à compressão e a deformação específica última axial ϵ_{ccu} .

Os pilares bem-confinados apresentam aumento contínuo de sua relação tensão-deformação específica até a deformação específica última. Os pilares com baixas taxas de confinamento apresentam resistência à compressão máxima com deformações específicas menores que a de ruptura ϵ_{cc} . Esses comportamentos são mostrados na Figura 3.5.

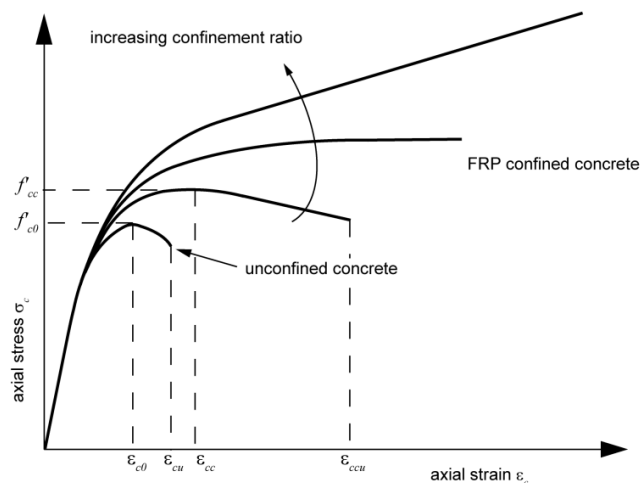


Figura 3.5 – Tensão vs. deformação específica para concreto não-confinado e para diferentes taxas de confinamento com CFC (MOTAVALLI, 2014).

3.3. Geometria de pilares

Os pilares são executados com seções transversais das mais variadas geometrias. As principais que serão abordadas neste estudo são a circular e retangular.

A tensão lateral de confinamento exercido pelo sistema de CFC depende da geometria da seção transversal.

Pilares de seção transversal circular têm raio de curvatura único o que proporciona uma pressão de confinamento uniforme. Quanto mais próximo da seção circular, mais

uniforme será a distribuição das tensões de confinamento, ou seja, mais eficiente será o reforço.

Em pilares de seção transversal quadrada ou retangular, existe o efeito de arqueamento de tensões causando uma distribuição de tensões não uniforme, com concentração nos cantos. Nesse caso é importante no momento da execução arredondar os cantos da seção transversal, diminuindo assim a concentração de tensões nesses pontos.

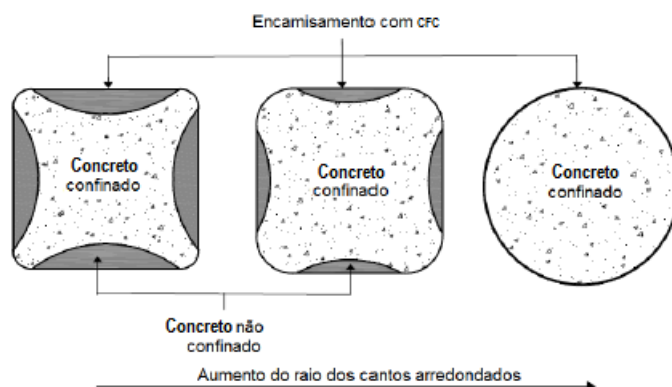


Figura 3.6 – Efeito de arqueamento da tensão em seções diferentes (adaptado de AL-SALLOUM *apud* HENRIQUES, 2015).

Como foi visto no caso de um pilar de seção circular com um encamisamento total a tensão lateral de confinamento é uniforme ao longo de todo o perímetro da seção e pode ser calculado pela expressão (3.1). No caso de uma seção não circular, como as retangulares, a tensão lateral é não uniforme. Sendo assim, para o cálculo da sua tensão lateral de confinamento é introduzido um fator de efetividade k_e , dado por:

$$k_e = k_p k_s \quad (3.3)$$

onde

k_p – coeficiente que leva em conta o efeito do envolvimento parcial ($k_p \leq$



1,0);

k_s – coeficiente de esbeltez da seção transversal ($k_s \leq 1$).

Para calcular a tensão lateral de confinamento de uma seção não circular faz-se uso da expressão (3.2) com a utilização da (3.3) donde:

$$f_{l,a} = k_e \frac{2t_f}{d} E_f \varepsilon_{f,rup} \quad (3.4)$$

3.3.1. Modelo de Mander *et al.* (1988) para calcular o coeficiente de esbeltez

K_s

Mander *et al.* (1988) propuseram k_s para calcular a área efetivamente confinada considerando a perda de eficiência pelo efeito de arqueamento de tensões devido ao raio dos cantos:

$$k_s = 1 - \frac{(b - 2 r_c)^2 + (d - 2 r_c)^3}{3 A_g (1 - \rho_{sc})} \quad (3.5)$$

$$A_g = bh - (4 - \pi)r_c^2 \quad (3.6)$$

onde

b – base da seção transversal

r_c – raio de curvatura do canto da seção transversal do pilar;

A_g – área da seção do pilar com cantos arredondados;

ρ_{sc} – taxa geométrica das armaduras longitudinais em relação à área total da seção de concreto.

No modelo proposto por Mander *et al.* (1988) e no FIB Bulletin 14 o cálculo do coeficiente de esbeltez k_s e a tensão máxima real de confinamento $f_{l,a}$ consideram as

duas direções principais separadamente, com d iguais às dimensões da seção transversal na direção considerada.

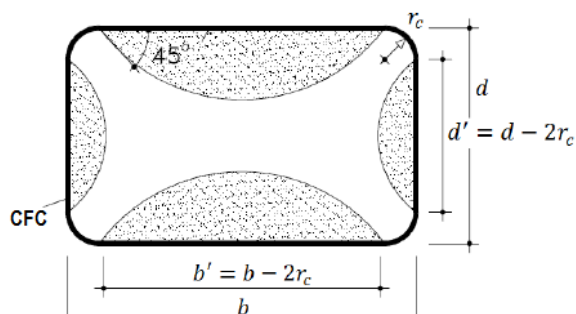


Figura 3.7- Seção retangular confinada com CFC (adaptado de FIB BULLETIN, 2011).

3.3.2. Modelo de Karam e Tabbara (2005) para o cálculo do coeficiente de esbeltez K_s

Karam e Tabbara (2005) propuseram uma alternativa para o cálculo do k_s baseada em simulações numéricas da zona parabólica não confinada. A Figura 3.8 mostra o quadrante superior direito de um pilar retangular, nela Karam e Tabbara (2005) relacionam a resultante das tensões horizontais e verticais com a tensão de confinamento no canto do pilar fazendo o equilíbrio de forças, mostrado na Figura 3.8 dado por:

$$t_f \sigma_f = \frac{b}{2} \sigma_b = \frac{h}{2} \sigma_h \quad (3.7)$$

$$t_f \sigma_f = r_c \sigma_r \quad (3.8)$$

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_b} = \frac{b}{2r_c} \quad (3.9)$$

$$\frac{\sigma_h}{\sigma_b} = \frac{b}{h} \quad (3.10)$$

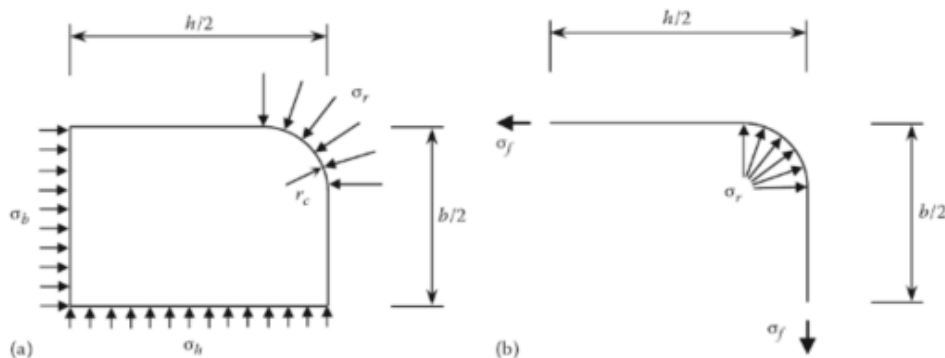


Figura 3.8 – Diagrama de corpo livre do quadrante superior direito (KARAM, G. e TABBARA *apud* LANG e HERWING, 2013). (a) Forças que atuam no concreto. (b) Forças que atuam no confinamento

O coeficiente k_s é definido dividindo-se a tensão média de confinamento em toda a seção transversal pela tensão máxima de confinamento obtida nos cantos, sendo dado pelas equações (3.9) e (3.10) assim:

$$k_s = \frac{\sigma_b + \sigma_h}{2} \frac{1}{\sigma_r} = \frac{r_c}{b} \left(1 + \frac{b}{h} \right) \quad (3.11)$$

No modelo de Karam e Tabbara (2005) não se tem o diâmetro equivalente para obtenção da tensão $f_{l,a}$, optou-se então por utilizar o diâmetro equivalente proposto por Lam e Teng (2003b), equação 3.14, para o cálculo da tensão $f_{l,a}$.

3.3.3. Modelo de Lam e Teng (2003b) para o cálculo do coeficiente de esbeltez k_s

Lam e Teng (2003b) propuseram outro modelo de cálculo para o k_s , também baseado na ação parabólica da zona não confinada. O modelo permite o cálculo da resistência à compressão confinada, bem como a tensão compressiva axial final ε_{ccu} . A resistência à compressão confinada é calculada com o fator de esbeltez k_{s1} e a deformação específica de compressão axial final com o fator de esbeltez k_{s2} . A área efetivamente confinada é igual à área da seção subtraída de quatro parábolas, conforme a Figura 3.7. As inclinações dessas parábolas têm coeficiente angular igual às linhas diagonais adjacentes.

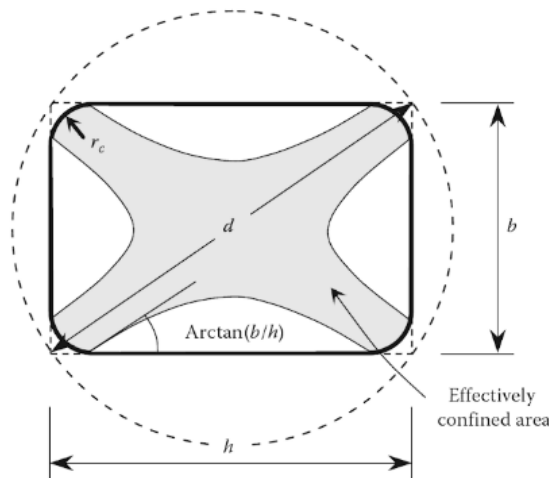


Figura 3.9 – Área da seção de concreto efetivamente confinada (HOLLAWAY, L.C e TENG J.G *apud* LANG e HERWING, 2013).

Segundo Lam e Teng (2003b) o fator de esbeltez k_{s1} é dado por:

$$k_{s1} = \left(\frac{b}{h}\right)^2 \frac{A_e}{A_c} \quad (3.12)$$

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - \left(\frac{b}{h}\right)(h - 2r_c)^2 + \frac{h}{b}(b - 2r_c)^2/3A_g}{1 - \rho_{sc}} \quad (3.13)$$

Lam e Teng (2003b) propuseram o cálculo de um diâmetro equivalente para se obter a tensão máxima de confinamento $f_{l,a}$ da equação (3.4):

$$d = \sqrt{h^2 + b^2} \quad (3.14)$$

$$f_{l,a} = k_e \frac{2t_f}{\sqrt{h^2 + b^2}} E_f \varepsilon_{f,rupt} \quad (3.15)$$

Segundo Lam e Teng (2003b) a tensão máxima de compressão axial é calculada com o fator de esbeltez k_{s2} , assim:

$$k_{s2} = \left(\frac{h}{b}\right)^{0,5} \frac{A_e}{A_c} \quad (3.16)$$

A tensão $f_{l,a}$ adotada pelo ACI 440.2R-08 (2008) é baseada no fator de esbeltez k_{s2} de Lam e Teng (2003b), considerando a seção encamisada completamente, sendo dada por:

$$f_{l,a} = k_{s2} \frac{2t_f}{\sqrt{h^2 + b^2}} E_f \varepsilon_{f,rupt} \quad (3.17)$$

3.3.4. Modelo de Teng *et al.* (2002) para cálculo do coeficiente de esbeltez considerando a seção elíptica

Teng *et al.* (2002) propuseram transformar a seção transversal do pilar em uma seção equivalente elíptica com maior efeito de confinamento. Segundo testes feitos pelos autores comprovam que a eficácia do confinamento diminui conforme a razão (b/h) aumenta.

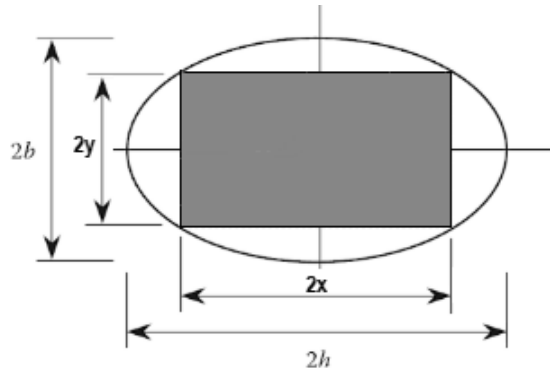


Figura 3.10 – Seção transversal elíptica equivalente (adaptado de LANG e HERWING 2013)

O fator de esbeltez k_s de acordo com Teng *et al.* (2002) é expresso como:

$$k_s = \left(\frac{b}{h}\right)^2 \quad (3.18)$$

onde h e b são a maior e a menor direção, respectivamente, da seção transversal elíptica conforme a Figura 3.7.



Realizando otimização de um retângulo inscrito em uma elipse obtém-se as seguintes relações entre as medidas da elipse e retângulo:

$$x = \frac{h\sqrt{2}}{2}; y = \frac{b\sqrt{2}}{2} \quad (3.20)$$

$$h = x\sqrt{2}; b = y\sqrt{2} \quad (3.21)$$

Segundo Teng *et al.* (2002) o diâmetro equivalente da seção elíptica pode ser calculado da seguinte forma:

$$d = \frac{4bh}{[1,5(h + b) - \sqrt{hb}]} \quad (3.22)$$

Dessa forma o cálculo da força de confinamento $f_{l,a}$ da equação (3.4) pode ser rescrita da seguinte forma:

$$f_{l,a} = k_e \frac{2t_f[1,5(h + b) - \sqrt{hb}]}{4bh} E_f \varepsilon_{f,rup} \quad (3.23)$$

3.4. Tipos de reforços

3.4.1. Adição de armadura metálica externamente

O reforço de elementos estruturais via encamisamento de concreto armado ainda é amplamente empregado, mas impõe algumas condições. Há perda de espaço interno, aumento do peso próprio da estrutura e maior necessidade de mão de obra (pedreiros, carpinteiros, armadores) se comparado a outros métodos. Muitas vezes também se faz necessário a interrupção temporária da utilização da edificação.

3.4.2. Encamisamento metálico

A técnica que antecedeu o reforço com CFC e na qual os métodos de cálculo de reforço com fibras se baseiam. Tem diversas características apresentadas anteriormente, mas uma peculiaridade que é válida apontar é que seus métodos de

cálculo permitiram a correlação com os CFC e possibilitaram a elaboração de métodos de dimensionamento de tais reforços.

3.4.3. Encamisamento com CFC

O reforço por encamisamento de pilares com CFC são realizados com a aplicação de mantas ou um tecido flexível colocado externamente. Esse material pode ser aplicado de forma contínua, em toda a altura do pilar, ou parcial por meio de faixas de determinadas larguras Figura 3.8. O encamisamento pode ser aplicado com uma ou mais camadas de CFC, dependendo do dimensionamento. As fibras do sistema são unidirecionais, orientadas na direção paralela à direção transversal do pilar.

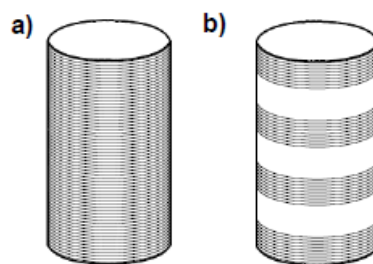


Figura 3.11 – Tipos de encamisamento com CFC (WU, 2006 *apud* HENRIQUES, 2015): a) encamisamento contínuo; b) encamisamento parcial.

No encamisamento parcial, existem zonas confinadas e zonas não confinadas como pode ser visto na Figura 3.9. Essas zonas não confinadas comprometem a eficiência do reforço.

De acordo com o FIB bulletin 14 (2001), essa ineficiência de confinamento é considerada por meio de um coeficiente k_p , dado por:

$$k_p = \frac{A_e}{A_c} = \frac{(1 - (s'/2d))^2}{1 - \rho_{sc}} \approx \left(1 - \frac{s'}{2d}\right)^2 \quad (3.24)$$

$$\rho_{sc} = \frac{A_{sl}}{A_c} \quad (3.25)$$

$$A_e = \frac{\pi}{4} \left(d - \frac{s'}{2} \right)^2 \quad (3.26)$$

onde

A_e – área de concreto efetivamente confinado;

A_c – área de concreto da seção do pilar;

A_{sl} – área de armadura longitudinal;

s' – distância entre duas faixas consecutivas de CFC;

d – diâmetro equivalente do pilar, proposto por Lam e Teng (2003b). Equação (3.14);

ρ_{sc} – porcentagem de armaduras longitudinais em relação à área total da seção de concreto.

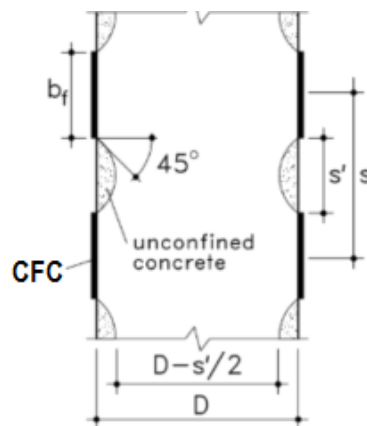


Figura 3.12 – Zonas não confinadas do encamisamento parcial de um pilar (adaptado do FIB Bulletin 14, 2001).

3.5. Execução do reforço em CFC



O reforço do pilar de concreto armado por encamisamento utilizando tecidos de CFC é um processo relativamente simples, mas deve-se ter alguns cuidados. O processo necessita de um tratamento preparatório, estando este diretamente relacionado com a eficiência do encamisamento e por tanto deve ser realizado por mão de obra qualificada. Embora o processo de aplicação possa variar entre os fabricantes do tecido de CFC e instaladores os procedimentos geralmente consistem nos seguintes passos:

Recuperação do substrato de concreto – Para realizar o reparo é fundamental que o substrato de concreto ao qual será aderido o tecido de CFC esteja íntegro e sã. Todas as causas das patologias existentes deverão ser tratadas antes da aplicação do reforço.

Segundo MACHADO (2010) no caso em que seja identificada a presença de corrosão nas armaduras torna-se necessário a execução dos seguintes procedimentos:

- remoção do concreto desagregado junto às armaduras corroídas;
- regularização do perímetro do trecho de substrato a ser recomposto;
- limpeza da corrosão das barras da armadura;
- passivação das armaduras recuperadas;
- recomposição do substrato de concreto.

No caso de fissuras presentes na estrutura todas deverão ser tratadas e recuperadas de injeção com resina epóxica sob pressão ou por gravidade, conforme for a necessidade.

Preparação da superfície para o recebimento do tecido de CFC – o concreto precisa dispor uma superfície suficientemente resistente na interface concreto/tecido de CFC, para que seja garantida a transferência de esforços. A utilização de abrasivos ou jatos de água ou areia são geralmente usados para a limpeza da superfície onde será



aplicado o tecido de CFC (Figura 3.13a). A limpeza é importante para a remoção de poeira, pó e material não aderidos que podem comprometer a aderência.

No caso do reforço com tecido de CFC em pilares retangulares é necessário realizar o arredondamento das quinas envolvidas na área de aplicação com o objetivo de evitar o efeito de arqueamento de tensões que causa uma distribuição de tensões não uniformes concentrada nos cantos e que podem acabar rompendo as fibras de carbono presentes nessa região. O manual da Sika (2004) recomenda que as quinas e bordas arredondadas tenham um raio de pelo menos 1,25 mm.

Aplicação do imprimador primário e regularizador de superfície – A aplicação do imprimador primário é importante para que haja a penetrar do produto nos poros do concreto assegurando uma boa aderência dos tecidos de CFC ao substrato (Figura 3.13b). As massas regularizadoras de superfícies têm o objetivo de corrigir apicoadas, rebarbas ou irregularidades superiores a 2 mm, com a finalidade de obter uma superfície plana (Figura 3.13c). Quando maior a irregularidade superficial maior será o consumo do material.

Saturação via seca e via úmida com resina – a saturação via seca é aplicada uma resina para saturar o tecido de CFC conforme mostra a **Figura 3.13d**. Uma alternativa é a saturação via úmida onde o tecido de CFC é saturado em uma bancada sendo depois transportado para a sua aplicação (**Figura 3.14**), com uma limitação no comprimento do tecido a ser transportado, da ordem de 3,5 a 4,0 m.

Segundo Machado (2010) existem duas correntes distintas com relação ao procedimento de saturação. A primeira advoga que a saturação do tecido na bancada conduz uma condição de trabalhabilidade e economia de resina maior a corrente que advoga a saturação diretamente na peça de concreto a ser reforçada.

Aplicação do tecido de CFC na estrutura de concreto armado – é importante aplicar o tecido observando a orientação das fibras carbono de modo a não permitir a ocorrência de ondulações, desvios de direção e presença de bolas de ar que possam comprometer o desempenho do confinamento do elemento (Figura 3.13e).

Aplicação da Segunda camada de saturação – nessa etapa é realizada a aplicação de uma segunda camada de resina agora sobre o tecido de CFC aplicado, para garantir a total imersão das fibras de carbono (**Figura 3.13f**). Como pode ser necessária a aplicação de mais camadas de tecido de CFC os esses dois últimos procedimentos são repetidos sucessivamente para cada camada.

Aplicação de revestimento de proteção – essa etapa pode ser meramente estética com aplicação de revestimentos coloridos a fim de esconder o os tecidos de CFC ou realmente de proteção contra fogo ou raios ultravioletas (**Figura 3.13g**).

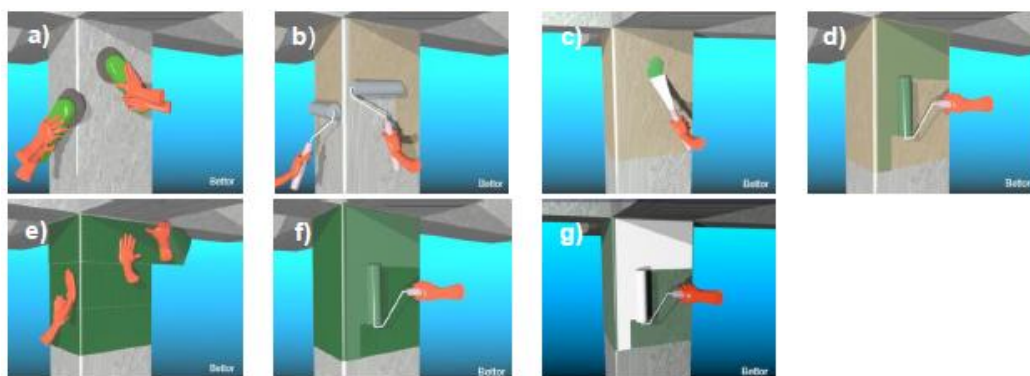


Figura 3.13 — Sequência de execução do sistema CFC. (HENRIQUE 2015): a) preparação da superfície; b) aplicação do primário; c) reparação da superfície; d) aplicação da primeira camada de resina; e) aplicação dos tecidos; f) aplicação da segunda camada de resina; g) revestimento de proteção.



Figura 3.14 – Saturação via úmida do tecido de CFC (MACHADO, 2010).

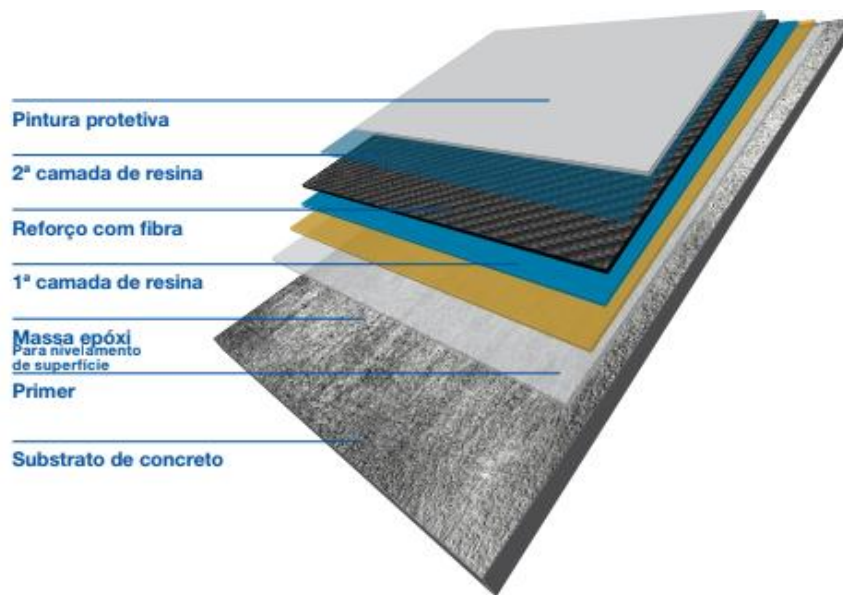


Figura 3.15 – Sequência de aplicação do sistema CFRP. (Adaptado de SILVA, 2013).



4. Modelos teóricos para o reforço com CFC

Os objetivos dos modelos teóricos que apresentados são os de, a partir de dados geométricos da seção, propriedades dos materiais e estado atual de tensões no elemento estrutural, prever o comportamento do sistema reforçado.

Há diversos modelos desenvolvidos na literatura, mas neste trabalho serão apresentados modelos de resistência do concreto armado confinado e modelos de deformação específica do concreto armado confinado.

4.1. Modelos de resistência do concreto armado confinado

4.1.1. Mirmiran e Shahawy

Os primeiros estudos sobre o confinamento do concreto armado, foram realizados por Richart *et al.* (1928) na década de 1920, quando foram concebidos em modelos de concreto sujeitos a uma pressão hidrostática lateralmente. A partir da análise dos modelos foram propostas equações simples que permitem determinar a tensão de ruptura à compressão do concreto armado confinado. Posteriormente foi adotada pelo ISIS Canada Design Manual no. 4 (2001) e pelo ACI 440.2R-08 (2008) segundo Mirmiran e Shahawy(1997) é dado por:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} = 1 + k_1 \left(\frac{f_{l,a}}{f'_{c0}} \right) \quad 3.1)$$

onde

f'_{cc}, f'_{c0} – resistências à compressão do concreto confinado e não-confinado, respectivamente;

k_1 – coeficiente de efetividade;

$f_{l,a}$ – tensão máxima de confinamento .



Lam e Teng (2002) propuseram o valor de 3,3 para o coeficiente de efetividade, que também foi adotado pelo ISIS Canada Design Manual no. 4 (2001) e pelo ACI 440.2R-08 (2008).

4.1.2. Mander *et al.*

Derivado do confinamento de pilares em aço, Mander *et al.* (1988) propuseram uma relação não linear.

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} = 2,254 \times \sqrt{1 + 7,94 \left(\frac{f_{l,a}}{f'_{c0}}\right)} - 2 \left(\frac{f_{l,a}}{f'_{c0}}\right) - 1,254 \quad (3.2)$$

Essa foi constado no FIB Bulletin 14 (2001) sendo amplamente aceita para o comportamento de colunas confinadas com CFC.

4.2. Deformação específica do concreto armado confinado

A relação para a deformação específica axial ε_{cc} quando o elemento tem determinada resistência a compressão f'_{cc} foi proposta por Richart *et al.* (1929):

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{c0}} = 1 + k_2 \left(\frac{f_{l,a}}{f'_{c0}}\right) \quad (3.3)$$

onde

ε_{c0} – deformação específica de compressão do concreto não confinado relativa à sua resistência à compressão não confinada;

k_2 – coeficiente de aprimoramento de deformação específica, Richart *et al.* (1929) sugerem $k_2 = 5k_1$.

A equação (4.5) fica:

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{c0}} = 1 + 5k_1 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} - 1\right) \quad (3.4)$$



Essa relação é indicada também por Mander *et al.* (1988) em seu modelo de relação tensão-deformação específica em pilares confinados com aço, e foi adotada e no FIB *Bulletin 14* (2001).

4.3. Deformações últimas de concreto armado confinado

4.3.1. Seible *et al.*

A adotada pelo *fib bulletin 14* (2001) para a determinação da deformação específica na ruptura do concreto confinado foi proposta por Seible *et al.* (1995):

$$\varepsilon_{ccu} = 0,004 + \frac{2,5\rho_f f_f \varepsilon_{f,rup}}{f'_{cc}} \quad (3.5)$$

onde:

ρ_f – taxa volumétrica do confinamento em CFC.

$$\rho_f = \frac{4t_f}{d} \quad (3.6)$$

4.3.2. Lam e Teng (2003a)

Para o cálculo de ε_{ccu} Lam e Teng (2003a) propuseram uma nova equação baseada na linha de melhor tendência traçada a partir de dados dos resultados de ensaios:

$$\varepsilon_{ccu} = 1,75 + 12 \left(\frac{f_{l,a}}{f'_{c0}} \right) \left(\frac{\varepsilon_{f,rup}}{\varepsilon_{c0}} \right)^{0,45} \quad (3.7)$$

Essa equação foi adotada pelo ACI 440.2R-08 (2008) com o termo 1,5 ao invés de 1,75.

4.4. Modelos orientados a projeto

Têm diversas simplificações que limitam os usos de tais modelos para estudos que demandam elevado grau de precisão, no entanto fornecem resultados satisfatórios para o desenvolvimento de projetos de reforço em CFC.

O modelo orientado a projeto abordado neste estudo é o proposto por Lam e Teng (2003a), que assume o comportamento do diagrama tensão-deformação específica é parabólico em sua primeira parte e linear na segunda. Essa modelo é válida apenas para casos em que a razão $f_{1,a}/f'_{c0} \geq 7\%$ é válida.

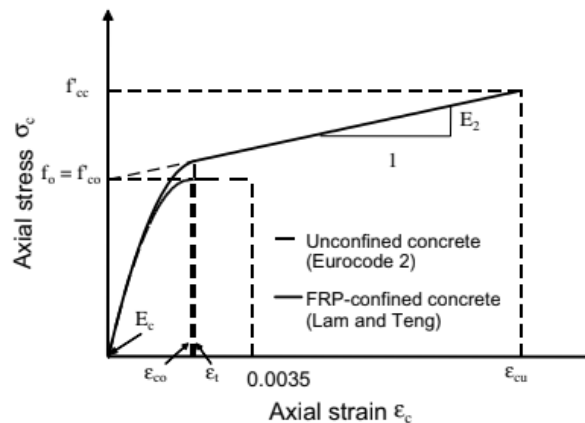


Figura 4.1 – Modelo orientado a projeto (LAM e TENG, 2003).

As equações 4.8 a 4.10 a seguir modelam o comportamento do trecho parabólico ($0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_t$).

$$\sigma_c = E_c \epsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f_0} \epsilon_c^2 \quad (3.8)$$

$$E_2 = \frac{f'_{cc} - f_0}{\epsilon_{ccu}} \quad (3.9)$$

$$\epsilon_t = \frac{2f_0}{(E_c - E_2)} \quad (3.10)$$

onde:

σ_c, ϵ_c – tensão de compressão e deformação específica do concreto,



respectivamente;

E_c – módulo de elasticidade do concreto;

E_2 – inclinação do segundo trecho (constante) dada por;

f_0 – tensão correspondente à interseção dos trechos parabólico e linear;

ε_t – deformação específica correspondente ao ponto de tensão f_0 .

O comportamento linear ($\varepsilon_t \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{ccu}$) é dado por

$$\sigma_c = f_0 + E_2 \varepsilon_c \quad \text{sendo } f_0 = f'_{c0} \quad (3.11)$$

4.5. Modelos orientados a análise

São modelos que têm como objetivo o estudo completo do comportamento dos efeitos de confinamento e o fazem por meio de métodos iterativos. Neste estudo será abordado o modelo proposto por Spoelstra e Monti (1999).

4.5.1. Modelo de Spoelstra e Monti (1999)

O modelo proposto por Spoelstra e Monti (1999) é um modelo iterativo e incremental a partir do aumento contínuo da tensão lateral de confinamento fundamentada no modelo proposto por Mander *et al.* (1988) para confinamento de concreto por aço, é utilizada para o cálculo da tensão de confinamento do concreto, porém, tem correções iteradas das tensões laterais devido ao confinamento de natureza elástica do CFC. A relação tensão deformação específica é baseada nas equações de Popovics (1973):

sendo

$$\sigma_c = f'_{cc} x r \quad (3.12)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (3.13)$$



$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (3.14)$$

A tensão de confinamento f'_{cc} é dada pela equação (4.2) e a deformação específica ε_{ccu} a partir da equação (4.4). Para expressar a relação entre a deformação lateral ε_l devido a tensão no concreto σ_c e a deformação específica do concreto ε_c foi utilizado as seguintes equações proposto por Pantazopoulou e Mills (1995):

$$\varepsilon_l = \frac{E_c \varepsilon_c - \sigma_c}{2\beta \sigma_c} \quad (3.15)$$

A constante β é uma propriedade do concreto não confinado e pode ser expressa da seguinte forma:

$$\beta = \frac{5700}{\sqrt{|f'_{c0}|}} - 500 \quad (3.16)$$

A iteração incremental de Spoelstra e Monti (1999) funciona a partir de um valor da deformação específica do concreto ε_c , e por meio de iterações sucessivas chega-se ao valor da tensão no concreto correspondente à essa deformação específica. Na primeira etapa da iteração estimasse um valor de σ_L . Na segunda etapa calcula-se o valor da tensão de confinamento do concreto por meio da equação (4.4). Na terceira etapa tem-se a tensão no concreto σ_c por meio da equação (4.12). A quarta etapa admite que, por equilíbrio, a deformação específica do CFC é igual à deformação específica do concreto, que é calculada e atualizada pela equação (4.13). Na quinta etapa a tensão confinante lateral σ_L do CFC no concreto é calculado por meio da equação (3.1). Esse valor é atualizado como σ_L e com ele é novamente calculada a nova estimativa para a deformação específica ε_L , levando a um processo iterativo até que σ_L convirja para um valor correto. Todo o processo é repetido para o próximo incremento de ε_c .

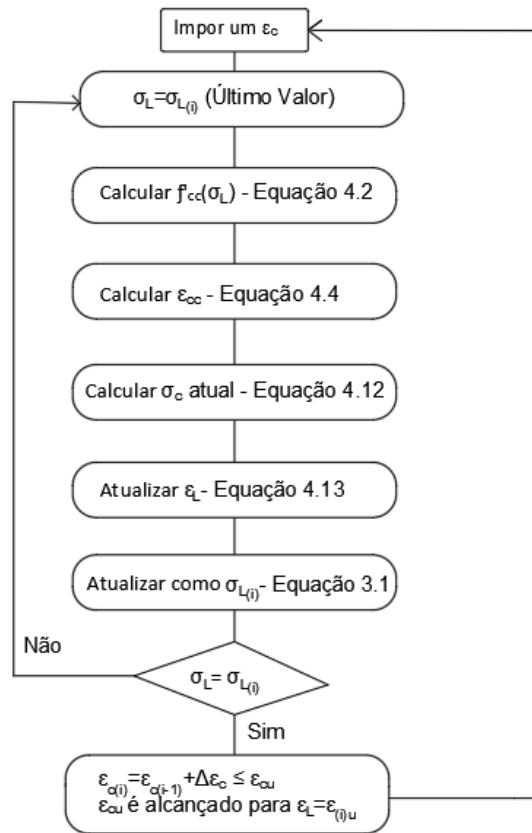


Figura 4.2 - Procedimento iterativo (Adaptado de Spoelstra e Monti, 1999).



5. Análise dos resultados obtidos com os modelos

5.1. Materiais analisados

Com o objetivo de direcionar os resultados de maneira a torna-los mais significativos, utilizou-se os seguintes materiais:

Tabela 5.1 – Materiais e propriedades.

Dados considerados na avaliação	
Fibra	
Nome comercial	SikaWrap®-300 C
Espessura da camada	0,167 mm
Tensão de tração última	3200 Mpa
Módulo de elasticidade	210 Gpa
Deformação última	0,0159
Coefficiente de segurança	1,3
Aço	
Classificação	CA-50
Resistência última	500 Mpa
Coefficiente de segurança	1,15
Concreto	
Resistência característica	30 Mpa
Deformação específica em f'_{c0} (ϵ_{c0})	2‰
Coefficiente de segurança	1,4

Por motivos práticos, não foi considerado o confinamento parcial, resultando em um fator de parcialidade de confinamento (k_p) igual a 1,0 em todas as análises.

5.2. Geometrias e condições de análise escolhidas

Para a análise numérica dos modelos apresentados, foi feita a seguinte padronização das numerações e geometrias:



Tabela 5.2 – Geometrias dos pilares-exemplo.

Geometria da seção	Pilar	Dimensão	Dimensão
		cm	cm
Circular	P01		60
Circular	P02		80
Circular	P03		100
Retangular	P04	20	40
Retangular	P05	50	70

Para a determinação da carga aplicada foi seguida a seguinte metodologia proposta pela NBR6118.

Arbitrou-se a taxa de 1% de armadura existente na seção e calculou-se a resistência da seção com base apenas no sistema concreto e armadura por meio da Equação 5.1:

$$N_k = \frac{A_c \times f_{ck}}{1,87} \quad (5.1)$$

Majorou-se tal carga (N_k) em 40% para simular uma nova solicitação (N_d) a ser resistida pelo pilar reforçado.

$$N_d = 1,4 \times N_k \quad (5.2)$$

Tabela 5.3 – Características geométricas, resistências dos pilares sem reforço e novas cargas solicitantes (N_d).

Seção circular					
#	D cm	A_c cm ²	$A_{s,1\%}$ cm ²	N_k kN	N_d kN
P01	60	2827,43	28,27	6.337	8.872
P02	80	5026,55	50,27	11.267	15.773
P03	100	7853,98	78,54	17.604	24.646



5.3. Dimensionamento de reforços em CFC

5.3.1. Construção dos ábacos para dimensionamento de pilares circulares

Para traçar as curvas de incremento de resistência do pilar reforçado com CFC em função da taxa de aço presente na seção, foi necessário o cálculo das resistências da seção de concreto confinado. As mesmas seguem nas Tabelas 5-4, 5-5 e 5-6.

Tabela 5.4 – Resistências de projeto da seção confinada em função do modelo de cálculo e número de camadas de CFC para o pilar 01

P01		
NO camadas	f_{ccd}	
	Lam e Teng	Mander et al.
	MPa	MPa
1	20,82	23,18
2	23,43	27,35
3	26,03	30,96
4	28,64	34,14
5	31,25	36,99
6	33,86	39,57

Tabela 5.5 - Resistências de projeto da seção confinada em função do modelo de cálculo e número de camadas de CFC para o pilar 02.

P02		
NO camadas	f_{ccd}	
	Lam e Teng	Mander et al.
	MPa	MPa
1	20,17	22,03
2	22,12	25,35
3	24,08	28,30
4	26,03	30,96
5	27,99	33,38
6	29,95	35,60



Tabela 5.6 - Resistências de projeto da seção confinada em função do modelo de cálculo e número de camadas de CFC para o pilar 03.

P03		
NO camadas	f'ccd	
	Lam e Teng MPa	Mander <i>et al.</i> MPa
1	19,78	21,31
2	21,34	24,07
3	22,91	26,57
4	24,47	28,85
5	26,03	30,96
6	27,60	32,91

Com os valores das resistências das seções de concreto confinado, pode-se calcular a resistência da seção de concreto armado confinado em função da taxa de aço (ρ_s) presente. Temos então:

$$\sigma_c = f'_{ccd} + A_s \times f_{yk} / \gamma_s \quad (5.3)$$

onde:

- σ_c – resistência à compressão da seção confinada de concreto armado;
- f'_{ccd} – resistência à compressão da seção confinada de concreto;
- A_s – área de aço presente na seção. Também dada por:

$$A_s = \rho_s \times A_c \quad (5.4)$$

- f_{yk} – resistência última do aço presente no elemento estrutural;
- γ_s – coeficiente de segurança utilizado para o aço;

5.3.2. Exemplos de aplicação dos ábacos

Para o dimensionamento do reforço em fibra de carbono com as características apresentadas na Tabela 5.1 – Materiais e propriedades

5.3.2.1. Resultado de dimensionamento do reforço para o pilar P01

$$\sigma = \frac{N_d}{A_c} = \frac{8872 \times 10^3}{2827,43 \times 10^2} = 31,38 \text{ MPa}$$

$$\rho_s = 1\%$$

Modelo proposto por Lam e Teng (2002) para o cálculo de f'_{cc} :

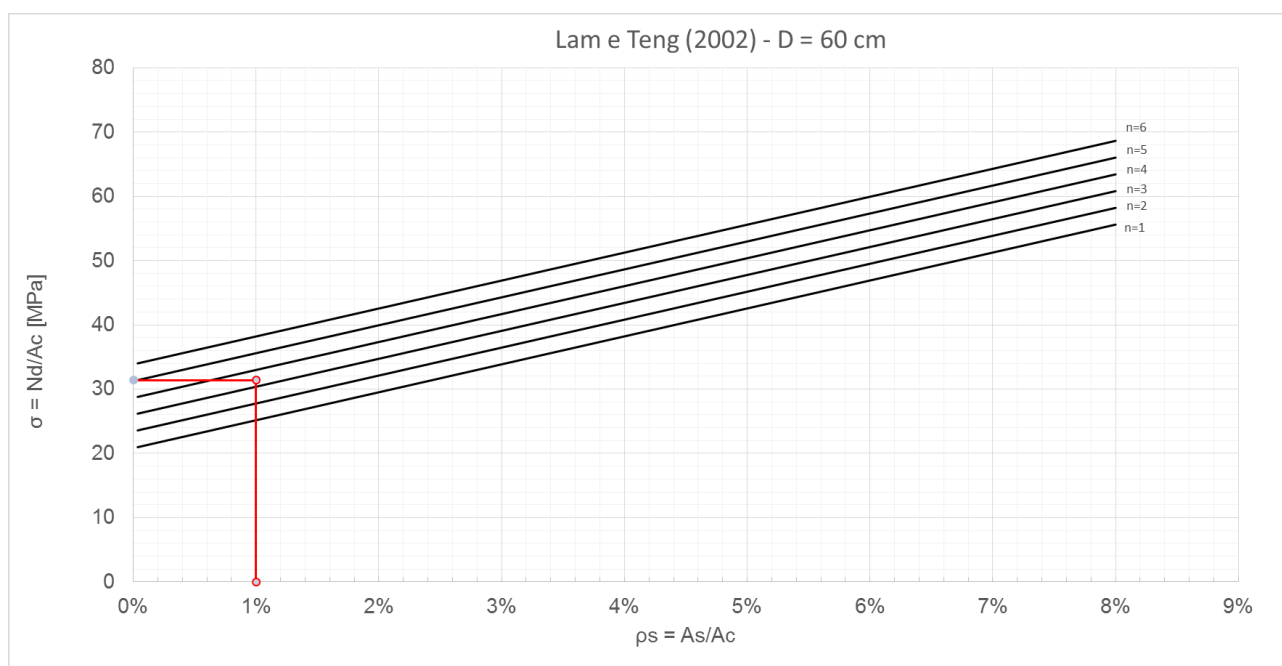


Figura 5.1 - Âbaco de dimensionamento de número de CFC para pilares de diâmetro de 60 cm pelo modelo de confinamento de Lam e Teng (2002).

Sabendo a tensão no concreto e a taxa de aço do pilar pode-se utilizar o gráfico de dimensionamento de reforço para pilares circulares de diâmetro igual a 60 cm pelo modelo de Lam e Teng (2002). O ponto referente à carga do pilar e a taxa de aço está entre as curvas $n = 3$ e $n = 4$.

Conclui-se que para realizar o reforço de um acréscimo de carga de 40% será necessário 4 camadas de CFC.



Modelo proposto por Mander *et al.* (1988) para o cálculo de f'_{cc} :

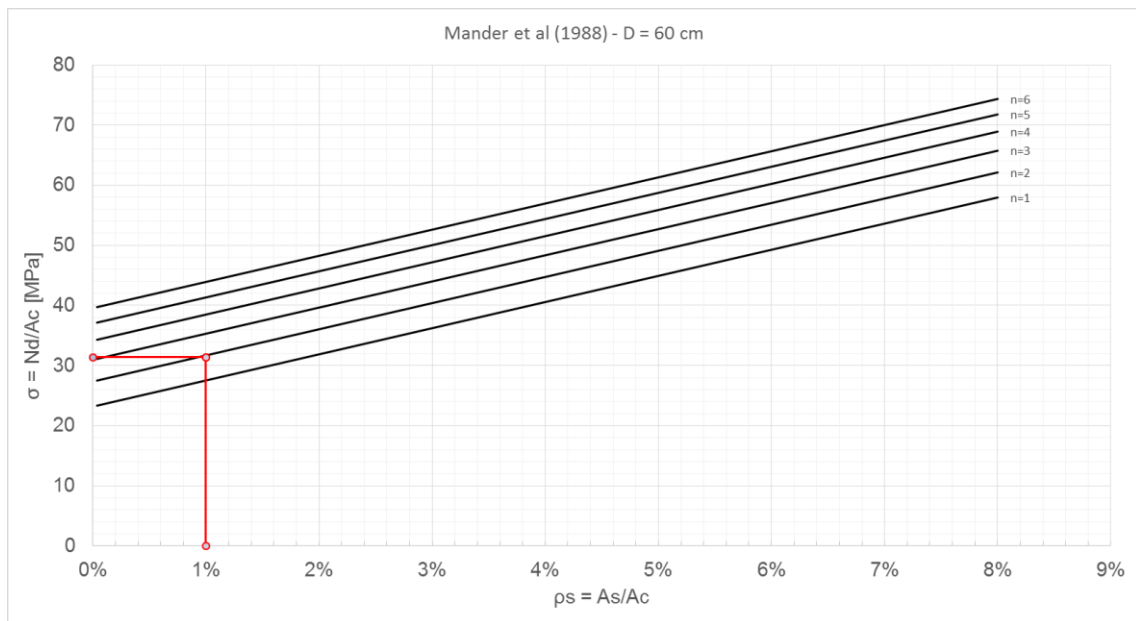


Figura 5.2 - Ábaco de dimensionamento de número de CFC para pilares de diâmetro de 60 cm pelo modelo de confinamento Mander *et al.*(1988).

Para realizar o reforço de um acréscimo de carga de 40% será necessário 2 camadas de CFC.

5.3.2.2. Resultado de dimensionamento do reforço para o pilar P02

$$\sigma = \frac{N_d}{A_c} = \frac{15773 \times 10^3}{5026,55 \times 10^2} = 31,38 \text{ MPa}$$

$$\rho_s = 1\%$$



Modelo proposto por Lam e Teng (2002) para o cálculo de f'_{cc} :

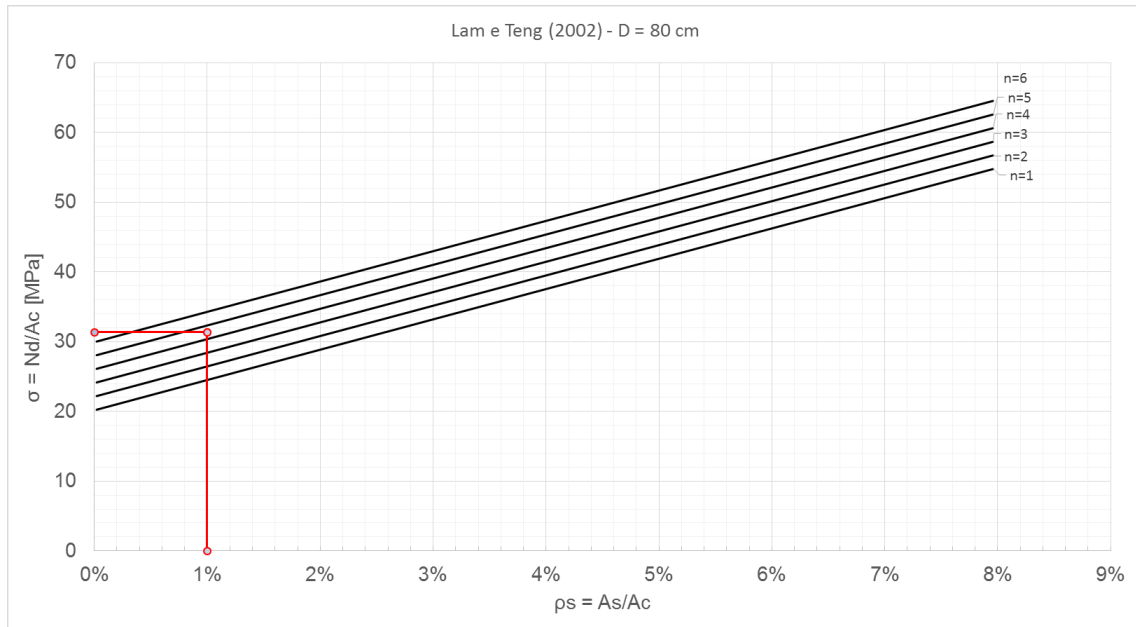


Figura 5.3 - Ábaco de dimensionamento de número de CFC para pilares de diâmetro de 80 cm pelo modelo de confinamento de Lam e Teng(2002).

Para realizar o reforço de um acréscimo de carga de 40% será necessário 5 camadas de CFC.

Modelo proposto por Mander *et al.* (1988) para o cálculo de f'_{cc} :

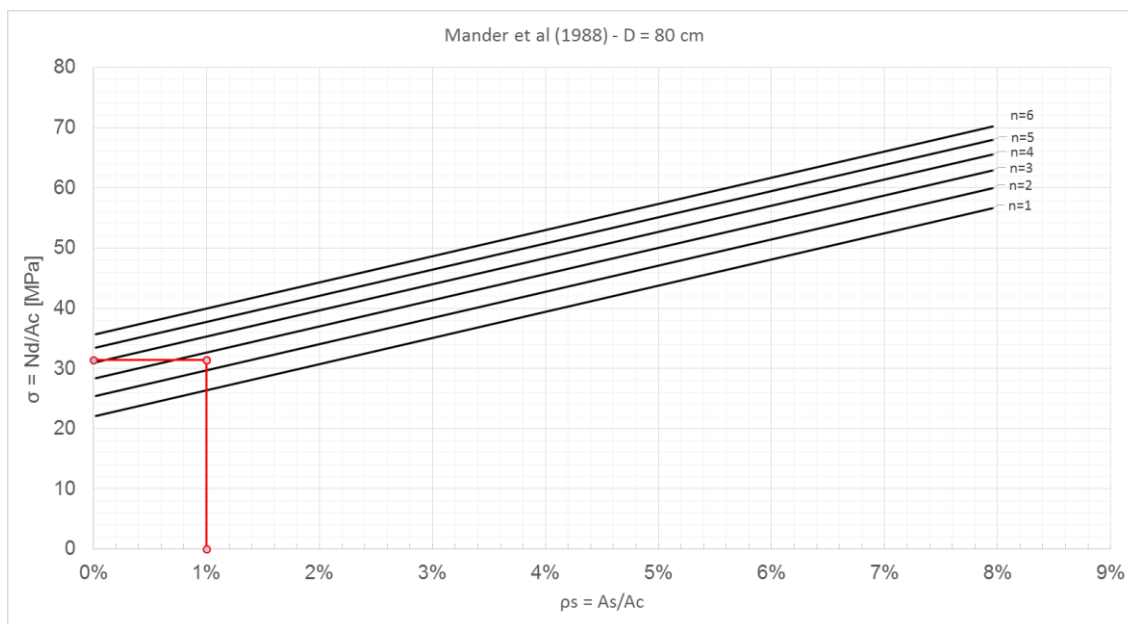


Figura 5.4 - Âbaco de dimensionamento de número de CFC para pilares de diâmetro de 80 cm pelo modelo de confinamento Mander et al.(1988).

Para realizar o reforço de um acréscimo de carga de 40% será necessário 3 camadas de CFC.

5.3.2.3. Resultado de dimensionamento do reforço para o pilar P03

$$\sigma = \frac{N_d}{A_c} = \frac{24646 \times 10^3}{7853,98 \times 10^2} = 31,38 \text{ MPa}$$

$$\rho_s = 1\%$$

Modelo proposto por Lam e Teng (2002) para o cálculo de f'_{cc} :

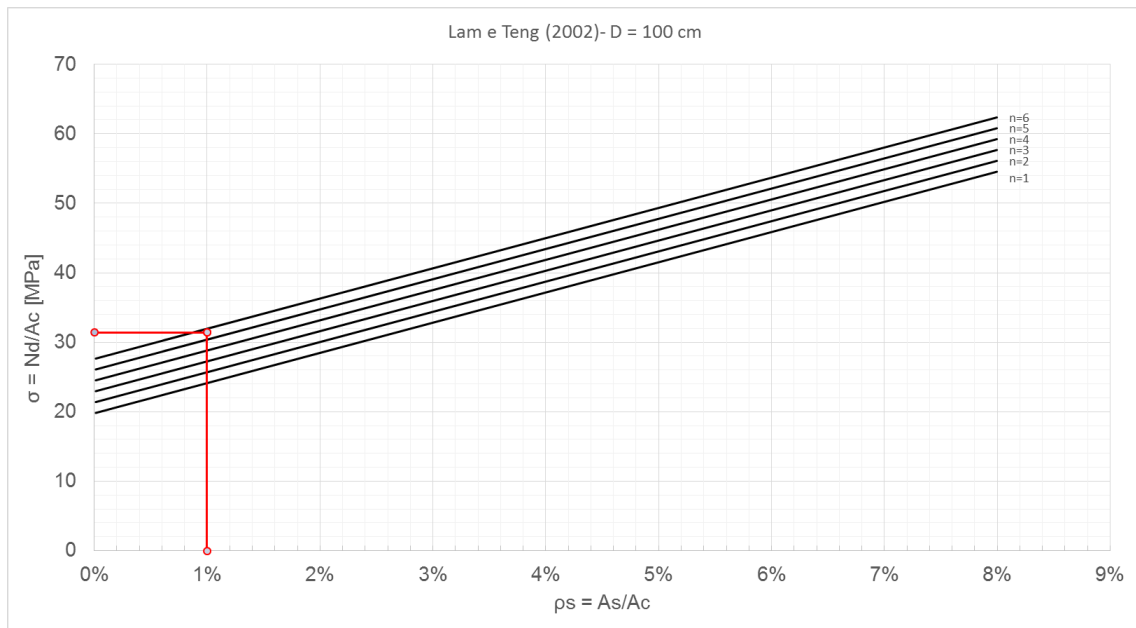


Figura 5.5 - Ábaco de dimensionamento de número de CFC para pilares de diâmetro de 100 cm pelo modelo de confinamento de Lam e Teng(2002).

Para realizar o reforço de um acréscimo de carga de 40% será necessário 6 camadas de CFC.

Modelo proposto por Mander *et al.* (1988) para o cálculo de f'_{cc} :

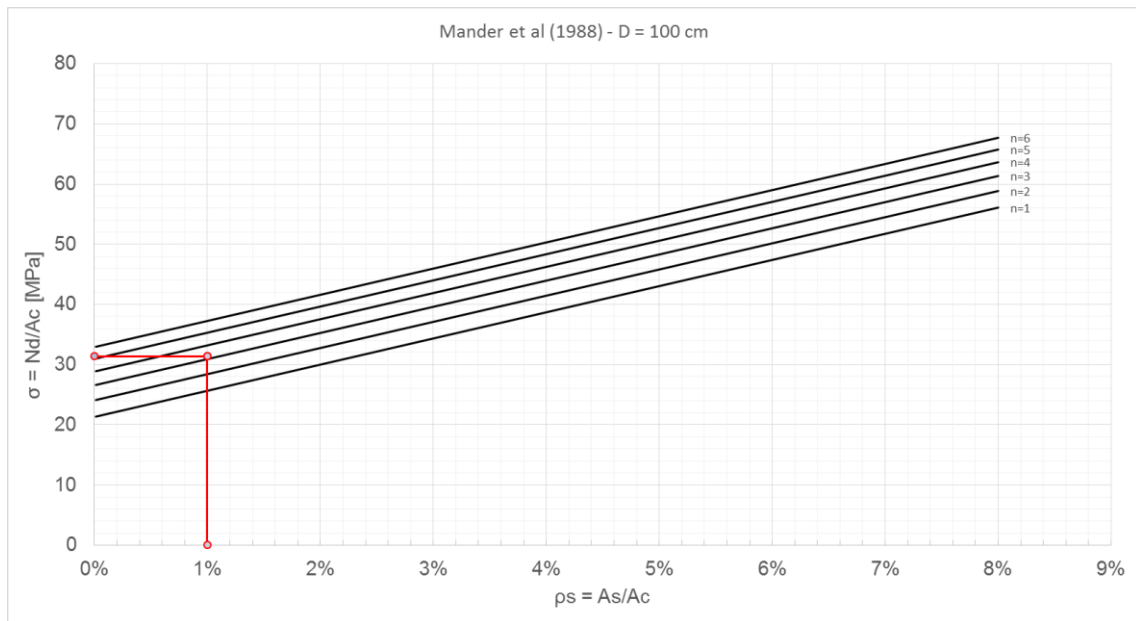


Figura 5.6 - Ábaco de dimensionamento de número de CFC para pilares de diâmetro de 100 cm pelo modelo de confinamento de Mander *et al.* (1988).

Para realizar o reforço de um acréscimo de carga de 40% será necessário 4 camadas de CFC.

Tabela 5.7 – Resumo do número de camadas de CFC necessárias conforme o pilar e o método.

Pilar	Número de camadas	
	Lam e Teng (2002)	Mander <i>et al.</i> (1988)
1	4	2
2	5	3
3	6	4



Tabela 5.8 – Desvio padrão dos resultados obtidos.

NO camadas	Desvio Padrão (σ [σc])	
	Mander et al.	Lam e Teng
1	1,73	0,57
2	1,65	1,05
3	2,21	1,58
4	2,66	2,11
5	3,04	2,63
6	3,35	3,16

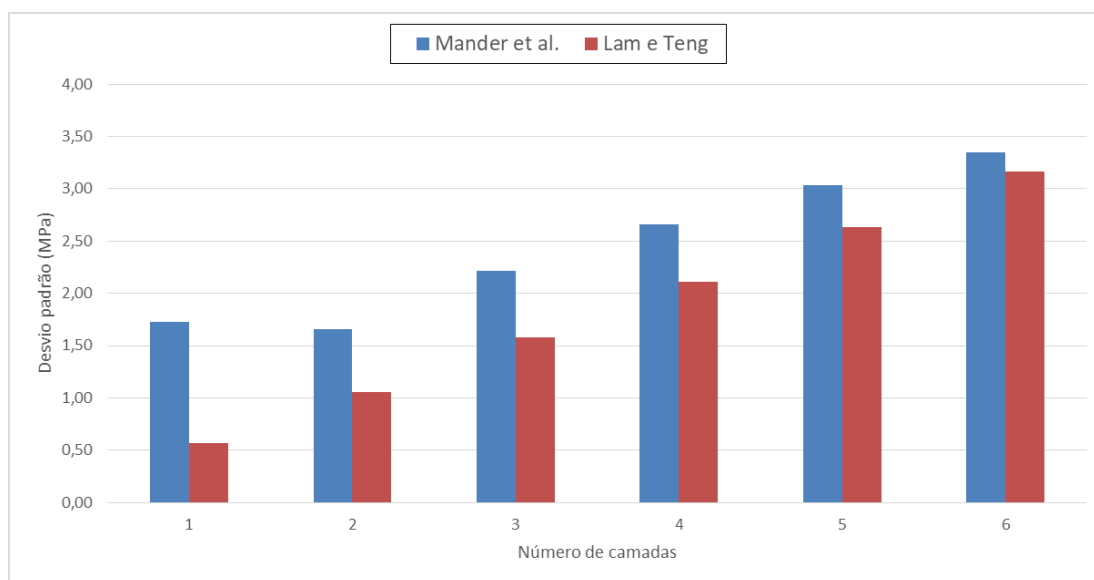


Figura 5.7 – Diagrama de barras com os desvios padrões dos modelos

A análise estatística acima confirma que a série formada pelos resultados do modelo proposto por Mander *et al.* (1988) possui erros maiores que a formada pelo modelo proposto por Lam e Teng (2002), pois a mesma considera a relação f'_{cc} e $f_{l,a}$ linear. Pode-se observar que os erros tendem a se igualar com o aumento do número de camadas de reforço.



5.3.3. Análise da significância de modelos propostos para o cálculo de k_s de pilares retangulares

Com o objetivo de estudar a variação de comportamento dos pilares retangulares em função da eficiência geométrica (k_s), analisaram-se separadamente os pilares P04 e P05, conforme exposto a seguir.

5.3.3.1. Resultado da análise do pilar P04

Tabela 5.9 – Tensões laterais de confinamento ($f_{l,a}$) calculadas com diferentes modelos de cálculo das taxas de eficiência geométricas para o pilar P04.

NO camadas	$f_{l,a}$ (MPa)				
	Mander (d = h)	Mander (d = b)	Karam e Tabbara	Lam e Teng	Teng <i>et al.</i>
1	0,97	3,42	0,52	1,61	0,27
2	1,93	6,83	1,05	3,23	0,53
3	2,90	10,25	1,57	4,84	0,80
4	3,86	13,67	2,09	6,46	1,06
5	4,83	17,08	2,62	8,07	1,33
6	5,79	20,50	3,14	9,69	1,60

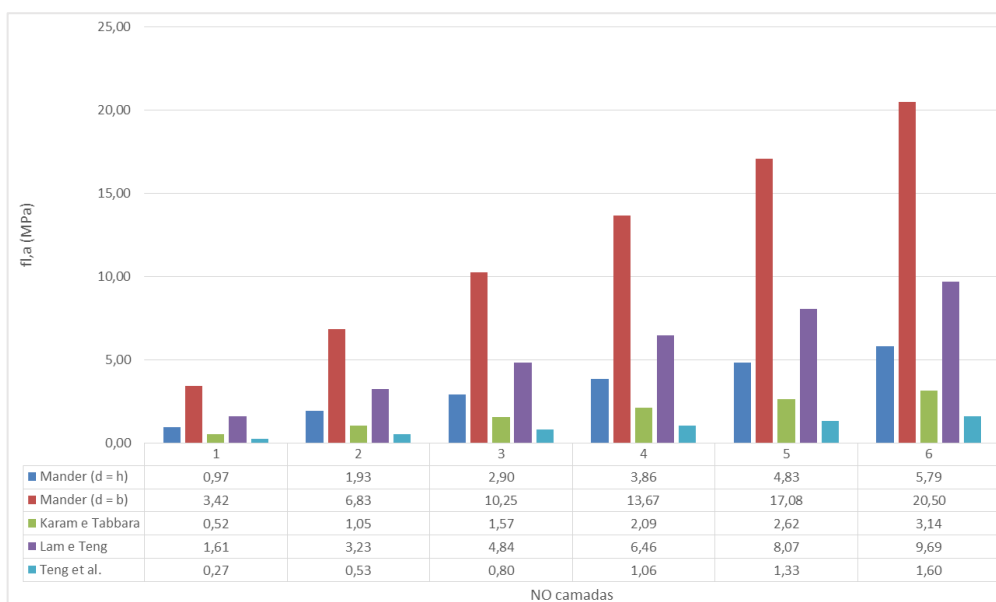


Figura 5.8 – Diagrama de colunas para análise gráfica dos resultados de $f_{l,a}$ propostos pelos diversos modelos de cálculo de k_s

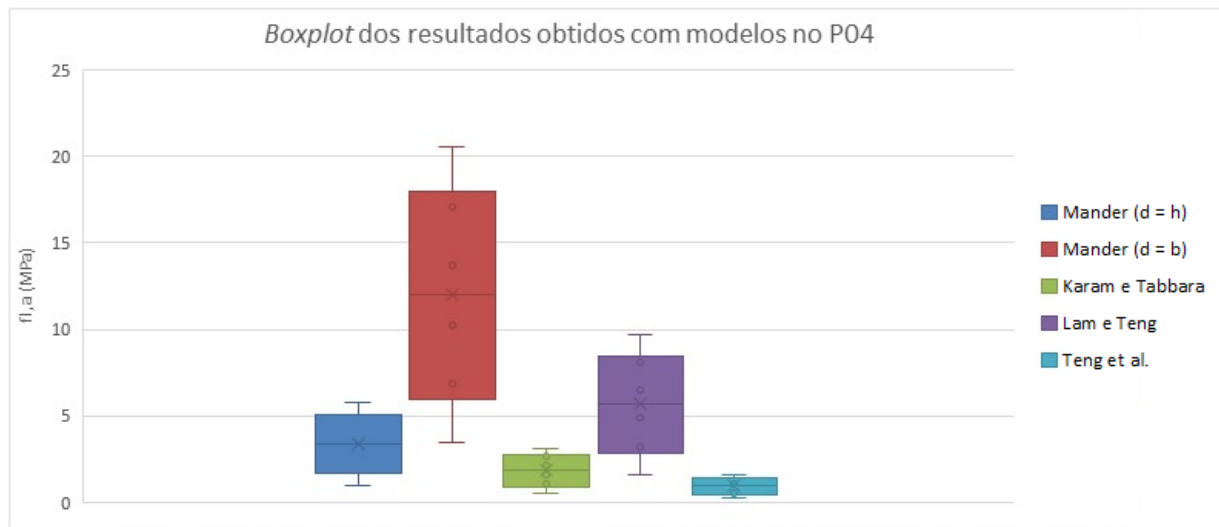


Figura 5.9 – Diagrama de caixas dos resultados para o pilar P04.

O desvio padrão relativo à série formada a partir dos resultados das tensões laterais de confinamento

5.3.3.2. Resultado da análise do pilar P05

Tabela 5.10 – Tensões laterais de confinamento ($f_{l,a}$) calculadas com diferentes modelos de cálculo das taxas de eficiência geométricas para o pilar P05.

NO camadas	$f_{l,a}$ (MPa)				
	Mander (d = h)	Mander (d = b)	Karam e Tabbara	Lam e Teng	Teng <i>et al.</i>
1	0,51	1,02	0,12	0,53	0,24
2	1,01	2,05	0,25	1,05	0,49
3	1,52	3,07	0,37	1,58	0,73
4	2,02	4,10	0,50	2,11	0,97
5	2,53	5,12	0,62	2,64	1,22
6	3,03	6,14	0,75	3,16	1,46

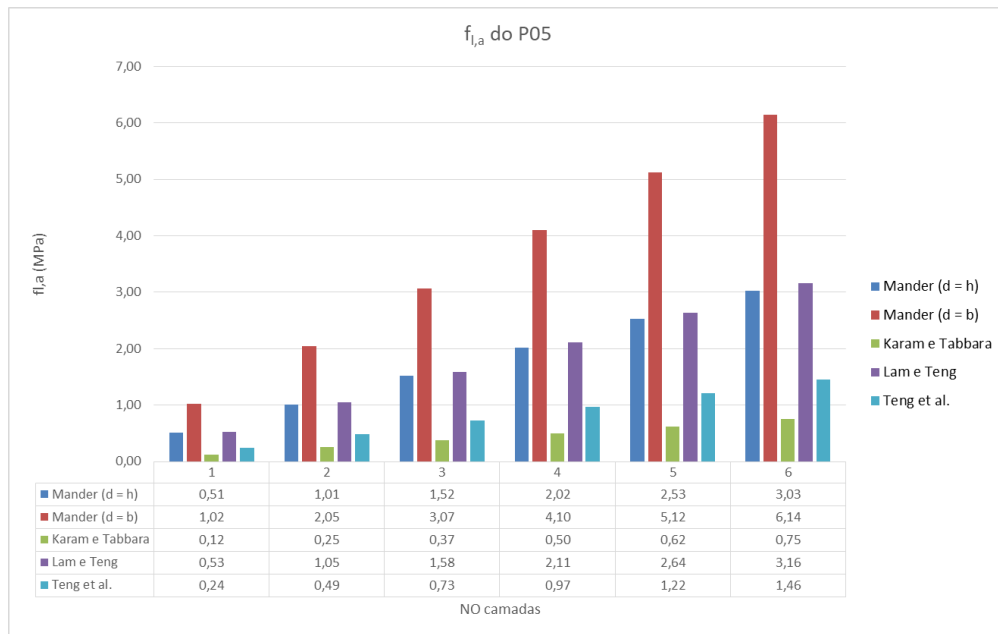


Figura 5.10 – Diagrama de colunas para análise gráfica dos resultados de $f_{i,a}$ propostos pelos diversos modelos de cálculo de k_s

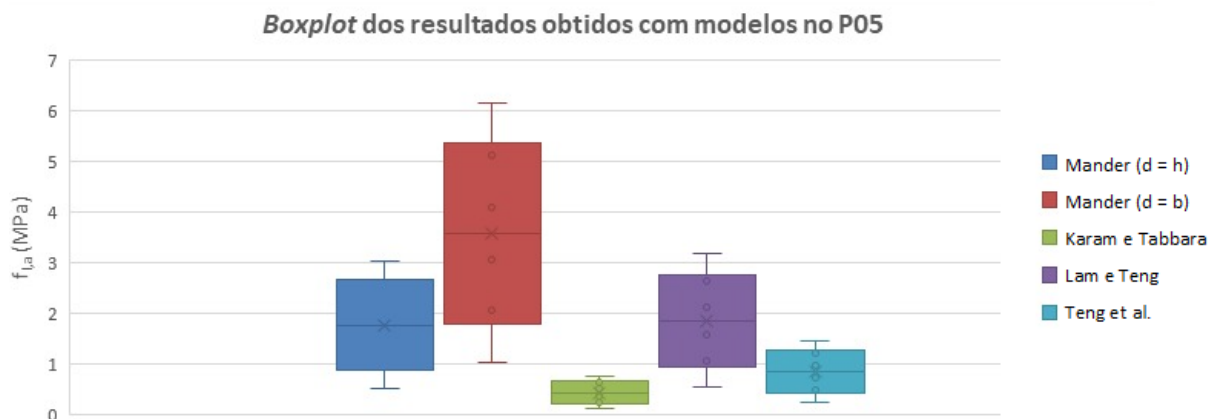


Figura 5.11 – Diagrama de caixas dos resultados para o pilar P05

Gerou-se a Figura 5.12 com o objetivo de facilitar a visualização combinada do comportamento dos pilares confinados com CFC.

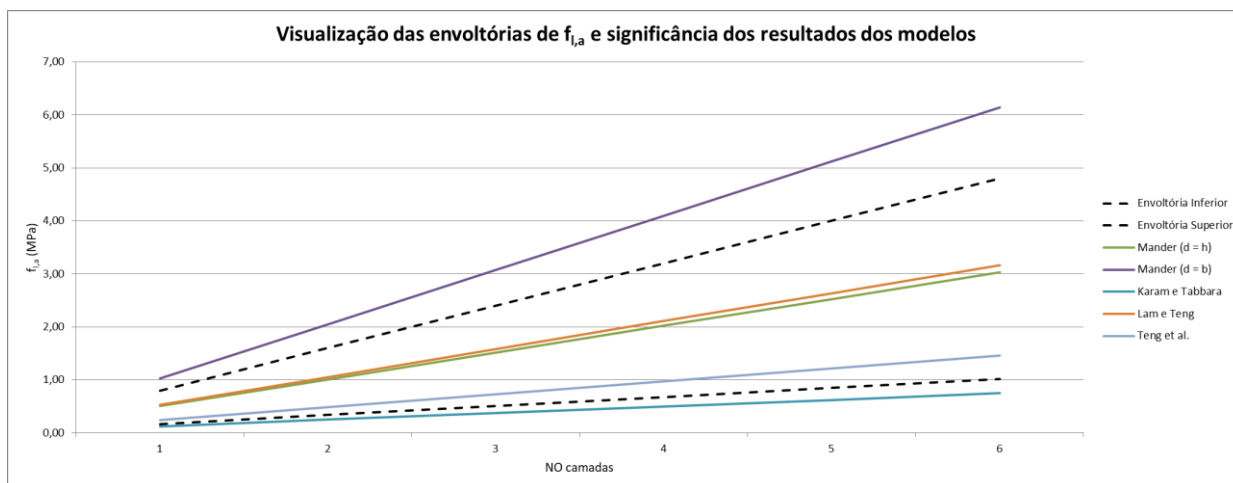


Figura 5.12 – Envoltórias de tensões laterais de confinamento, considerando resultados apresentados anteriormente para os pilares P04 e P05, combinados.

Como resultado da análise estatística resumida acima, conclui-se:

- O modelo proposto por Mander *et al.* com $d = b$ superestima a tensão lateral de confinamento – série se encontra acima da envoltória superior (Figura 5.12) – resultando em um dimensionamento de reforço mais econômico, mas, devido ao seu alto erro (ver Figuras 5.9 e 5.11), provavelmente deve divergir do comportamento experimental de pilares confinados com CFC submetidos a compressão centrada.
- O modelo proposto por Karam e Tabbara subestima a tensão lateral de confinamento – série se encontra abaixo da envoltória inferior (Figura 5.12) – resultando em reforços menos econômicos.
- Os modelos que apresentam maior significância são: Mander *et al.* (1988) com $d = h$, Lam e Teng (2002) e Teng *et al.* (2003). Nos diagramas de caixa (Figuras 5.9 e 5.11) pode-se observar que, dos cinco modelos estudados, o proposto por Teng *et al.* é o com menor desvio padrão mas que, dos 3 supracitados como significativos, é o que resulta em menores valores para a tensão de confinamento lateral. Isso se traduz em, para uma maior precisão de resultados, os mesmos serem mais conservadores, resultando em reforços menos econômicos.



6. Considerações finais

6.1. Sugestão para trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros nessa área podem ser citados:

- Estudar a influência da variação do raio de curvatura nos pilares retangulares em relação a eficácia do confinamento utilizando os modelos de Mander *et al.* (1988), Karam e Tabbara (2005), Lam e Teng (2003b) e Teng *et al.* (2002) para o cálculo do índice de esbeltes (K_s).
- Desenvolver um estudo experimental com pilares de concreto armado reforçados com CFC à compressão a fim de complementar a análise teórica realizada nesse trabalho.
- Estudar o efeito da aplicação de uma carga excêntrica no pilar de concreto armado confinado com fibras de carbono.



7. Referências

ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures**. ACI Committee 440. Detroit, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR-6118: **Projeto de Estruturas de Concreto Armado**. Rio de Janeiro, 2003.

CARRAZEDO, R. **Mecanismos de confinamento e suas implicações no reforço de pilares de concreto por encamisamento com compósito de fibras de carbono**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 173 f, 2002.

CARRAZEDO, R. **Mecanismos de confinamento em pilares de concreto encamisados com polímeros reforçados com fibras submetidos à flexo-compressão**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005

CURTY, L. A. **Estudo experimental dos consoles curtos de concreto armado reforçado com compósitos de fibra de carbono**, 2009. 193f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Fib, Externally bonded FRP reinforcement for RC structures, International Federation for Structural Concrete, Bulletin 14, Lausanne, Switzerland. 2001.

HENRIQUES, S. **Reforço de Pilares de Betão por Encamisamento Híbrido com Mantas de FRP**. Tese (Mestrado) – Técnico Lisboa, Lisboa, 2015.

<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/125/artigo285695-2.aspx>. Acesso em 16/10/2018.



JUVANDES, L. F. **Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão usando Materiais Compósitos de CFRP**, Dissertação de Doutor em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1999.

KARAM, G.; TABBARA, M. **Confinement effectiveness in rectangular concrete columns with giber reinforced polymer wraps**. ASCE journal of composites for construction. 2005.

LAM, L.; TENG J.G. **Strength models for FRP-confined concrete**, ASCE Journal of Structural Engineering. 128(5), 612-623. 2002.

LAM, L.; TENG, J. G. **Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete**. J. Construction and Building Materials, Elsevier, vol. 17, pp. 471-489. 2003a

LAM, L.; TENG, J. G. **Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete in rectangular columns**. Construction and Building Materials, Elsevier. 2003b

LANG, K.; HERWING A. **The International Handbook of FRP Composites in Civil Engineering**, capítulo 16 – Confinement of Reinforced Concrete Columns, 2013.

LEONI, R.; SOUZA, J. **Reforço com Tela de Fibra de Carbono sob Proteção de Concreto ou Argamassas Minerais**. Revista Técnica, São Paulo, n. 194, 2013.

MACHADO, A. P. **Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono**. São Paulo: Viapol, 2010.

MACHADO, A. P. **Reforço estrutural com vase em lâminas e barras de fibras de carbono**. Apresentação na AVECE – São Paulo. <http://www.abece.com.br/e-artigosabece007.pdf>. Acesso em 18/10/2018.

MBRACE. Catálogo eletrônico de Produtos, <https://www.master-builders-solutions.basf.com.br>. Acesso em 18/10/2018.



MIRMIRAN, A.; SHAHAWY, M. **Behavior of concrete columns confined by fiber composites**. J. Structural Engineering, ASCE, 123(5), pp. 583-590. 1997.

MOTAVALLI, M. **Composite Materials used in Rehabilitation**. In: ZOGHI, Manoochehr (Ed.). The International Handbook of FRP composites in Civil Engineering. Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2014.

Paula, A. P. **Influência da Geometria das Secções no Confinamento de Pilares de Betão Armado com Compósitos de CFRP**, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Estruturas, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2003.

SIKA. **Catálogo eletrônico de Produtos**, www.sika.com.br. Acesso em 18/10/2018.

Wu, Y.; Wei, Y. **General Stress-Strain Model for Steel- and FRP-Confined Concrete**. Journal of Composites for Construction / Volume 19 Issue 4, 2015.

WU, G.L.Z.T.; Wu, Z.S. **Strength and ductility of concrete cylinders confined with FRP composites**”, Construction and Building Materials, Vol. 20, 2006.